



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

Spectral ratio method를 이용한 탄성과 감쇠 특성 연구

**A study on Characteristics of Seismic Attenuation by using
Spectral Ratio Method**

지도교수 신 성 렬



2014년 2월

한국해양대학교 대학원

해양에너지자원공학과

이 진 우

본 논문을 이진우의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 장 원 일 (인)

위 원 신 성 렬 (인)

위 원 정 우 근 (인)



2013년 12월 27일

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	iv
List of Figures	v
Abstract	viii
1. 서 론	1
1.1 개요	1
2. 탄성과 감쇠 이론	3
2.1 탄성과 감쇠의 정의	3
2.2 탄성과 Quality factor, Q 와 Spectral ratio method	6
3. 탄성과 감쇠 모형실험 및 적용	15
3.1 탄성과 감쇠 축소모형실험	15
3.1.1 탄성과 감쇠 축소모형실험 구성	15
3.1.2 탄성과 감쇠 축소모형실험 방법	19
3.1.3 탄성과 감쇠 축소모형실험 결과	22
3.2 탄성과 감쇠 수치모형실험	27
3.2.1 탄성과 감쇠 수치모형실험 구성	27
3.2.2 탄성과 감쇠 수치모형실험 방법	29
3.2.3 탄성과 감쇠 수치모형실험 결과	31
3.2.3.1 1번 모델	31
3.2.3.2 2번 모델	37
3.2.3.3 3번 모델	39
3.2.3.4 4번 모델	42

3.3 현장 자료 적용	47
3.3.1 현장 자료 취득 및 처리	47
3.3.2 현장 자료 적용 및 분석	49
 4. 결론	 52
 감사의 글	 54
 References	 56
 Bibliography	 60



List of Tables

Table 1 Q and velocity for reference materials(Johnston, 1981)	21
Table 2 Experimental result of p-wave velocity, attenuation coefficient and Q values dependant axis	23
Table 3 Experimental result of attenuation coefficient and Q values in case of normal incidence survey model No. 1	31
Table 4 Experimental result of Frequency dependent gradient and Q values for reflection survey model No. 1 in case of shot-receiver interval 10m and 100m	34
Table 5 Experimental result of attenuation coefficient and Q values in case of normal incidence survey model No. 2	37
Table 6 Experimental result of attenuation coefficient and Q values for reflection survey model No. 2 in case of shot-receiver interval 10m	39
Table 7 Experimental result of attenuation coefficient and Q values in case of normal incidence survey model No. 3 in case of source frequency 50Hz and 100Hz	39
Table 8 Experimental result of attenuation coefficient and Q values for reflection survey model No. 3 in case of shot-receiver interval 10m and 100m with source frequency 50Hz	41
Table 9 Experimental result of attenuation coefficient and Q values for reflection survey model No. 3 in case of shot-receiver interval 10m and 100m with source frequency 100Hz	42
Table 10 Experimental result of attenuation coefficient and Q values in case of normal incidence survey model No. 4	44
Table 11 Experimental result of attenuation coefficient and Q values for reflection survey model No. 4 in case of shot-receiver interval 10m	44
Table 12 Result of attenuation coefficient and Q values for field data ...	49

List of Figures

Fig. 1 Partitioning of energy of a normally incident ray with amplitude A_0 into reflected and transmitted rays with respective amplitude A_1 . Z_1 and Z_2 are the acoustic impedances of the two layers	4
Fig. 2 The progressive diminution of energy per unit area caused by spherical propagation from an energy source at E	5
Fig. 3 Wave amplitude for a attenuated harmonic oscillator	9
Fig. 4 Q for longitudinal mode resonances of a 24 ST aluminium rod ..	12
Fig. 5 A flow chart of the data acquisition procedure	17
Fig. 6 (a)sample holder, (b)personal computer, (c)load cell, (d)indicator, (e)Transducer, (f)pulser-receiver, (g)models and (h)A/D converter	18
Fig. 7 (a)reference sample(aluminium) and (b)engineering plastic sample(acrylic)	19
Fig. 8 (a)The apparatus used for the transmission experiments using (b)aluminium and (c)acrylic	20
Fig. 9 Time domain waveform of (a)aluminum and (b)acrylic for X axis	24
Fig. 10 (a)The spectral amplitudes of aluminium and acrylic resulting from Fast Fourier transform and (b)The spectral ratios between aluminium and acrylic and the line of best fit for X axis	24
Fig. 11 Time domain waveform of (a)aluminum and (b)acrylic for Y axis	25
Fig. 12 (a)The spectral amplitude of aluminium and acrylic resulting from Fast Fourier transform and (b)The spectral ratios between aluminium and acrylic and the line of best fit for Y axis	25
Fig. 13 Time domain waveform of (a)aluminum and (b)acrylic for Z axis	26

Fig. 14 (a)The spectral amplitude of aluminium and acrylic resulting from Fast Fourier transform and (b)The spectral ratios between aluminium and acrylic and the line of best fit for Z axis	26
Fig. 15 (a)Elements of kinematic ray tracing and (b)elements of dynamic ray tracing	28
Fig. 16 A schematic diagram of the experimental set-up for (a)reflection survey and (b)normal incidence survey	30
Fig. 17 A schematic of layered model No.1 with physical properties, (a)velocity, (b)density and (c) Q value	32
Fig. 18 (a)Time domain waveform and (b)the spectral amplitude of resulting from Fast Fourier transform for model No. 1	33
Fig. 19 The spectral ratios between layers and the line of best fit	33
Fig. 20 (a)Time domain waveform and (b)the spectral amplitude of resulting from Fast Fourier transform for shot-receiver interval 10m	35
Fig. 21 (a)Time domain waveform and (b)the spectral amplitude of resulting from Fast Fourier transform for shot-receiver interval 100m	35
Fig. 22 The spectral ratios between layers and the line of best fit for shot-receiver interval 10m	36
Fig. 23 (a)Time domain waveform and (b)the spectral amplitude of resulting from Fast Fourier transform for shot-receiver interval 10m	36
Fig. 24 A schematic of layered model No.1 with physical properties, (a)velocity, (b)density and (c) Q value	38
Fig. 25 A schematic of layered model No.3 with physical properties, (a)velocity, (b)density and (c) Q value	40
Fig. 26 A schematic of layered model No.4 with physical properties, (a)velocity, (b)density and (c) Q value	43
Fig. 27 Time domain waveform for model No. 4	45
Fig. 28 The spectral amplitude of central frequency shift for model No. 4	4
Fig. 29 Flow chart for single channel seismic data processing	48

Fig. 30 A result of processed seismic section	51
---	----



A study on Characteristics of Seismic Attenuation by using Spectral Ratio Method

Lee, Jin Woo

Department of Ocean Energy & Resources Engineering
Division of Energy & Resources Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

Seismic attenuation is widely useful for enhancement of the resolution of the seismic data and also direct indicator of hydrocarbon. Theoretically, it makes more attenuation in the reservoirs with buried hydrocarbon than water saturated porous rocks, and the velocity of seismic that pass through the medium is affected by the another medium featuring earth's crust, the pore water in porous and those interaction.

In this study, Quality factor Q which has an inverse relationship with the seismic attenuation was used for analyzing physical modeling, numerical modeling and field data experiments. First, In physical modeling, it's been computed Acrylic's Q on Aluminium generally used as reference sample in indoor analyzing. Next in numerical modeling, it has drawn changes in properties on stratum by using seismic reflection survey and normal incidence survey, Q was resulted by attenuation effect

on Seismic occurred around its boundary. Lastly, On the application of field data, the material that analyse the aspect attenuated reflection interface on each stratum has been gotten from seismic survey in Geo-je Island in Namhae.

Q is not only a helpful forecasting means to detect reservoir features and hydrocarbon, but also it's important to study characteristic of mediums, enhance resolution of the seismic data and analyse AVO more effectively.

KEY WORDS: seismic attenuation, Quality factor, Spectral ratio method, physical modeling, numerical modeling, field data



제 1 장 서 론

1.1 개요

지층 내부를 전파하는 탄성파의 기록을 저장하는 탄성파 이미지 기술은 지구 물리 탐사에 있어 주요한 수단으로 사용되어왔다. 때문에 전 세계의 석유탐사 업계 뿐 만 아니라 학계에서는 이러한 탄성파 이미지 기술에 직접적으로 영향을 미치는 탄성파 감쇠에 관하여 주목하고 있는데, 특히 탄성파 감쇠는 탄성파 자료의 해상도의 향상과 직접적인 탄화수소 지시자로서 유용하게 사용된다. 이론적으로 탄화수소가 매장된 지하의 저류층은 음향학적으로 물로 포화된 다공질 암석보다 부드러운 경향을 보이며, 특히 부분적으로 유체로 충전된 암석의 경우 보다 감쇠가 잘 일어난다. 지각을 구성하는 암석과 퇴적물 등은 공극과 공극 내부에 포함된 공극수를 가지고 있다 이러한 매질을 통과하는 탄성파의 속도와 진폭의 감쇠는 지각을 구성하는 매질과 공극 내부의 공극수 및 그 상호간의 작용에 의하여 영향을 받는다(Toksöz et al., 1979; Purnell, 1986).

현재 탄성파 감쇠의 영향에 대한 관심은 축소모형실험이나 수치모형실험과 같은 실내시험법 뿐 만 아니라 현장 자료처리에 대한 적용을 통해 연구가 수행되고 있으며, 국외에서는 석유나 가스 등 지하자원탐사나 탄성파 속도와 메탄 하이드레이트의 포화율 사이의 정량적 관계를 추정하여 자원량을 평가하는 방법(Dasgupta & Clarck, 1998, Matsushima, 2005, 2006), 빙하퇴적상의 분석(Alessio et al., 2010) 등에 대하여 탄성파 감쇠와 관련된 다양한 연구가 이루어지고 있다. 그러나 국내의 경우, 토양층 지반진동의 감쇠(서만철 & 손호웅, 1996), 시추퇴적물의 음속과 감쇠계수(김성렬 등, 1991) 등과 같이 주로 지질분야와 관련된 연구가 이루어지고 있으며, 메탄 하이드레이트 부존층에서의 지진파 감쇠치 산출(이광호 & Matsushima, 2009)이외에는 자원 탐사와 관련된 탄

성과 감쇠 연구는 거의 전무한 실정이다.

본 연구에서는 **Spectral ratio method**를 이용하여 탄성과 탐사 자료에서 감쇠에 영향을 미치는 요인들을 확인하고자 하였다. 알루미늄을 기준 시료로 사용하고, Johnston(1981)이 수행한 선행연구와 비교하기 위해 비교 시료를 아크릴로 선정하여, 탄성과 축소모형실험을 통해 Q 를 측정하였다. 일반적으로 **Spectral ratio method**는 실내시험분석방법으로 사용되지만 본 연구에서는 축소모형실험을 통해 실내시험분석방법으로 실험 후 수치모형실험이나 현장 자료와 같은 확장된 형태로 적용 가능한지 확인하고 이를 적용하여 분석하였다. 탄성과 수치모형실험에서는 지층의 심도에 따라 **Quality factor**가 증가하거나 감소하는 모델을 대상으로 탄성과 감쇠의 양상을 살펴보았다. 또한 상·하부층이 반복되고 탄성과 속도 및 밀도 차이에 의해 큰 음향 임피던스 차이를 가지고 있어 정확한 Q 를 산출하기 어려운 구조인, 보다 실제 지질구조에 가까운 모델로 구성하여, 진폭의 역전현상과 진폭변화를 통해 탄성파가 해당 지층 하부층을 전파할 때의 탄성과 자료에 대한 영향을 확인하였다. 그리고 현장 자료에 대한 적용을 통해 탄성과 탐사 자료에서 감쇠를 발생시키는 영향을 파악하고, 이에 대한 원인을 분석하였다.



제 2 장 탄성과 감쇠 이론

2.1 탄성과 감쇠의 정의

탄성파의 진폭(amplitude, A)은 파가 매질 내에서 전파하는 동안 감소되는데, 이 때 탄성파 진폭의 손실은 주로 다음과 같은 영향에 의해 발생한다. 전파 거리에 따른 기하학적 확산손실(spherical divergence or geometrical spreading loss)과 파가 매질을 통과할 때 입자간의 마찰에 의해 열로 전환되어 에너지가 매질에 흡수되는 고유감쇠(intrinsic attenuation), 그리고 탄성파의 반사, 굴절, 회절에 의해 발생하는 산란(scattering)이 주원인이다(John M. R., 1998). 또한 탄성파 에너지의 양은 Fig. 1과 같이 매질의 각 층의 탄성파 속도 V 와 밀도 ρ 의 곱으로 표현되는 음향 임피던스(acoustic impedance, Z) 경계면을 지날 때 발생하는 탄성파의 반사 및 mode의 변환 등과 같은 이유로 에너지의 일부가 감소하게 되는 투과손실(transmission loss, T)과 매질의 물리적 성질과 밀접한 관계를 가지며, 매질의 공극률이 좋은 경우에 크게 영향을 미치고, 매질의 비탄성 모형을 나타내는 데 있어 매우 중요한 흡수손실(absorption loss), 반사계수(reflection coefficient, R), 단기간의 다중 반사(multiples), 모드 전환(mode conversion)과 같은 인터페이스 효과로 인한 원인 등이 감쇠(attenuation)가 발생하는 추가적인 원인이다(구남형 등, 2011). 특히 탄성파의 전달속도가 매질의 탄성특성(elastic properties)에 따르는 반면 감쇠는 비탄성 특성(anelastic properties)을 보이며, 매질의 물리적인 상태, 포화도 등에 대한 정보를 지시하므로 매우 중요한 의미를 갖는다.

기하학적 확산손실은 매질의 특성에 관계없이 탄성파의 전파과정 중 탄성파 에너지가 파원으로부터 방사상으로 전파하면서 거리가 멀어짐에 따라 단위 면

적당 탄성과 에너지가 감소하는 현상을 말한다. 탄성파의 강도(intensity, I)는

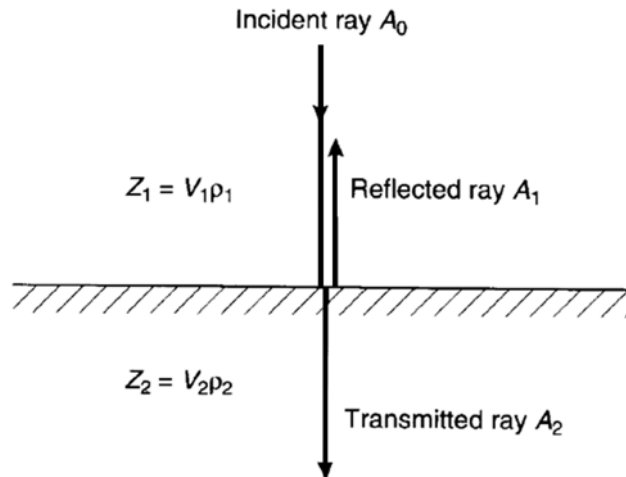


Fig. 1 Partitioning of energy of a normally incident ray with amplitude A_0 into reflected and transmitted rays with respective amplitude A_1 . Z_1 and Z_2 are the acoustic impedances of the two layers

파의 진행 방향과 수직인 면적에 대하여 단위 시간당 파에 의해 전달되는 에너지의 양으로 정의되고, 에너지의 밀도는 부피당 에너지의 정의된다. 그러므로 속도 V 로 진행하는 파의 강도는 진폭의 제곱과 주파수(frequency, f)의 제곱에 비례한다(Kuster & Toksöz, 1974). 3차원 무한 매질에서 점원(point source)을 발생시켰을 때, Fig 2와 같이 파의 생성 순간 총 에너지(E)는 시간에 따라 반경 r 이 증가하는 구형의 형태로 퍼져나간다. 이상적인 경우, 음원에 의해 탄성파 에너지가 발생하게 되면 특정 시간에 대하여 구형의 표면에 분포되어 있는 에너지는 파원으로부터 발생한 총 에너지를 나타내고, 그 값은 파원으로부터 거리가 변하여도 일정하다. 그러므로 단위 면적당 에너지는 총 에너지를 구형의 특정 표면적 S 로 나누어 구할 수 있다. 구형의 표면적은 $4\pi r^2$ 이기 때문에 에너지의 밀도는 파원으로부터의 거리 r 의 함수로써 표현된다. 따라서 거리를 제외하고는 모두 상수이기 때문에 단위 면적당 에너지는 거리의 제곱에 반비례하여 $E/4\pi r^2$ 이 되고, 보다 더 멀리 전파하여 반경이 R 이 될 때의 단위 면적당 에너지

지는 $E/4\pi R^2$ 이 된다. 반경은 $R > r$ 이므로 단위 면적당 에너지는

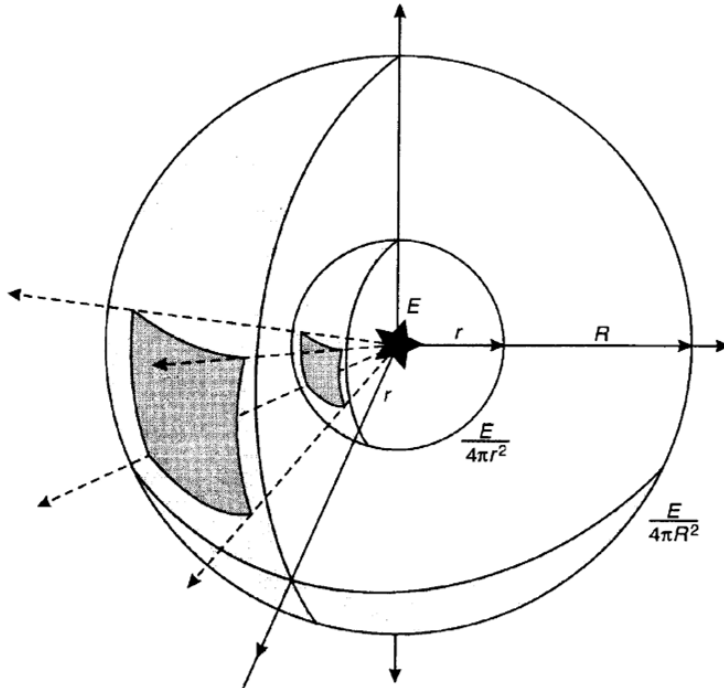


Fig 2 The progressive diminution of energy per unit area caused by spherical propagation from an energy source at E

$E/4\pi r^2 > E/4\pi R^2$ 이 된다. 즉 전파 반경이 증가함에 따라 $1/r^2$ 의 비율로 감소하게 되며, 따라서 에너지의 제공근으로 표현되는 진폭은 $1/r$ 의 비율로 감소한다.

탄성파 탐사 시, 측정되는 값은 에너지 밀도가 아닌 진폭 혹은 입자의 변위로써, 단위 면적당 에너지는 진폭의 제곱에 비례하므로 진폭은 에너지의 제곱근에 비례하고 파원으로부터의 거리에 반비례한다. 탄성파가 어떠한 과정으로 감쇠되는지에 대해서는 아직까지 명확하게 밝혀진 바는 없지만, 에너지의 흡수나 고유감쇠는 거리에 대한 지수함수의 형태로 감쇠한다고 알려져 있다. 또한 감쇠는 탄성파가 전파되는 매질의 종류에 따라 다르게 일어나는데, 이와 같은 특성을 감쇠계수(attenuation coefficient, α)로 나타낸다. 이로부터 기하학적 확산손실($1/r$)과 흡수손실($\exp(-\alpha r)$)을 조합하여 거리에 따른 진폭 감쇠를 나타낼 수 있다. 또한 감쇠계수는 단위거리 당 에너지의 손실률로 표현할 수 있으며, 파장에 대한 손실률이라 할 수 있다. 그러므로 에너지가 높은, 즉 진동이 많이

일어날수록 감쇠는 커지게 된다. 따라서 주파수가 증가할수록 감쇠계수가 증가하며, 저주파수는 고주파수에 비해 보다 느리게 감쇠한다. 고주파수가 저주파수에 비해 더 빨리 감쇠되는 효과는 주행거리가 증가함에 따라 진폭의 폭이 길어지는 현상과 일치한다(John M. R., 1998).

2.2 탄성과 Quality factor, Q 와 Spectral ratio method

음원에서 발생한 에너지가 어떤 매질을 전파할 때 거리에 따른 에너지의 감소를 투과손실(transmission loss, TL)이라 정의하며, 그 요인은 기하학적 확산손실(geometrical loss)과 매질의 구성물질 및 그 조직에 따라 달라지는 흡수, 산란 등의 그 밖의 손실효과(losses)로 구분하여(Kinsler et al., 2000) 식 (1)과 같이 표현한다.

$$TL = TL(geom) + TL(losses) \quad (1)$$

특히 후자에 의한 손실을 감쇠량으로 구분하여, 어떤 특정한 주파수에 대한 감쇠량을 감쇠계수(attenuation coefficient)로 정의한다. 이 감쇠계수는 탐사 조건이나 매질의 특성 등 외부 조건에 따라 그 값이 달라지기 때문에 실제로 탄성과 감쇠만을 수치화하여 비교하기가 어렵다. 따라서 무차원 변수인 Quality factor, Q , 혹은 그 역인 Q^{-1} 를 통해 감쇠를 표현하고, 이러한 Quality factor는 감쇠계수와 반비례 관계를 가진다. 즉, 감쇠가 크게 발생하면 Q 는 작아지고, 감쇠가 작게 발생하면 Q 는 커지는 반비례 관계를 가진다.

일반적으로 감쇠를 구하기 위한 방법에는 Spectral ratio method(Toksöz et al., 1979), Amplitude decay method(Peselnick and Zietz, 1959), Rise-time method(Galdwin and Stacey, 1974) 등 다양한 방법이 있지만 그중 Spectral ratio method는 다른 방법들에 비해 상대적으로 S/N(신호대잡음비)이 적다. Spectral ratio method는 P파와 S파의 탄성과 감쇠를 계산하기 위해 Toksöz 등(1979)에 의해 제안되었고, 주로 지하의 기하학적 구조와 수진기의 배열과 같은 외부감쇠(extrinsic attenuation)와 탄성과 다공성 매질의 상호작용에 의한 결

과인 고유감쇠를 구별하기 위하여 지구물리학자들에 의해 사용되어 왔다(Tarif & Bourbie, 1987). 이 방법은 일반적으로 실내시험방법으로 적용되며, 실제로 감쇠가 거의 일어나지 않는 기준 시료와 동일한 크기를 가지는 비교 시료에서 파가 전파될 때 기준 시료와 비교 시료의 스펙트럼 진폭비의 상대적인 감쇠를 측정하는데, 외부감쇠 효과를 극복하기 위해 기준 시료와 비교 시료의 크기 및 측정조건을 동일한 형태로 유지한다(Sears & Bonner, 1981). 또한 탄성 매질 보다 비탄성 매질에서 주파수가 증가하면 신호의 진폭이 감소한다는 현상에 근거한다. 감쇠계수는 탄성과 에너지의 사이클 당 마찰 에너지 손실로 정의된다(Knopoff, 1964; Toksöz & Johnston, 1979; Sheriff & Geldart, 1995). 특정 각주파수 ω 에서 응력이 매질에 주기적으로 주어진다면, 무차원 단위의 내부 마찰(비탄성)을 표현하면 아래 식 (2)와 같다.

$$\frac{1}{Q(\omega)} = -\frac{\Delta E}{2\pi E} \quad (2)$$

E 는 매질에 저장된 최대 응력 에너지이고, 탄성 매질내의 결함에 의해 발생하는 $-\Delta E$ 는 각 주기 당 에너지 손실이며, Q^{-1} 은 1주기 동안 감소된 에너지에 비례하며 Q 는 감쇠와 반비례 관계를 가진다. 위에 대한 정의는 직접적으로 사용되지 않지만, 실험에 의해 진폭과 주기가 변하지 않는 탄성파의 매질 요소를 유도하는 것이 가능하다. 보다 일반적으로 (i) 고정된 파수에서 정상파의 일시적인 진폭 감쇠나 (ii) 고정된 주파수에서 공간적인 진폭의 감쇠 중 하나를 관찰한다면, 탄성학에서 가장 일반적인 상황은 감쇠된 신호로 구성된 주파수 범위를 포함하는 것이고, 감쇠는 선형현상이며, 이에 대한 탄성과 진폭 신호는 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform, FFT)으로 확인 할 수 있다. (i)과 (ii) 각각에 대하여 푸리에 합성(Fourier synthesis) 통해 실제 탄성과 신호에서의 정확한 감쇠 효과를 알 수 있다. 선형 응력-변형을 관계에서 (i)과 (ii)의 경우, 진폭 A 는 $E^{1/2}$ (E : 에너지)에 비례 관계를 가진다. 예를 들어 A 는 최대 입자 속도로 나타내거나 파의 응력 요소이다. 또한 $Q \gg 1$ 이라고 가정하면, 거의 변형을 에너지와 같다. 따라서

$$\frac{1}{Q(\omega)} = -\frac{1}{\pi} \frac{\Delta A}{A} \quad (3)$$

로부터 감쇠에 의한 진폭 변동을 얻을 수 있다. 따라서 (i)의 경우는 $A = A(t)$ 라면, 초기 진폭이 $A = A_0$ 이라 주어지고, A 는 $\frac{2\pi}{\omega}, \frac{4\pi}{\omega}, \dots, \frac{2n\pi}{\omega}, \dots$ 만큼 $\frac{\pi}{Q}$ 동안 감소한다면,

$$A(t) = A_0 \left(1 - \frac{\pi}{Q}\right)^n \left(t = \frac{2n\pi}{\omega}\right) \quad (4)$$

으로 표현되고, $\exp(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{x}{n}\right)^n$ 의 정의를 사용하여,

$$A(t) = A_0 \left[1 - \frac{\omega t}{2Qn}\right]^n \rightarrow A_0 \exp\left[-\frac{\omega t}{2Q}\right] \quad (5)$$

와 같이 나타낸다. 지수함수 적으로 감소하는 값 $A(t)$ 로부터, 식 (5)를 이용하여 시간에 따른 Q 의 값을 정의할 수 있다. 이 값은 탄성파의 자유 진동의 감쇠를 묘사할 때 사용된다. 이산 시간을 사용하여 식 (5)의 결과를 얻을 수 있어야 하므로, 이 경우 (i)를 기반으로 한다. 그러나 (ii)의 경우, 거리 x 에 대하여 $A = A(x)$ 형태로 유도 하는 것이 보다 쉽기 때문에 입자 파동의 최고치는 다음의 거리 dx 에 따라 전개할 수 있고, 점진적으로 A 의 공간적인 감쇠를 확인할 수 있다. 최대 감쇠의 방향을 x 축으로 가정하였을 때, x 축이 파의 전파 방향이다.

$\Delta A = \left(\frac{dA}{dx}\right)\lambda$ 라면, $\lambda \left(\lambda = \frac{2\pi c}{\omega}\right)$ 는 각속도 ω 와 위상속도 c 에 관한 파장이다.

아래의 식 (6)은 지수함수적으로 감쇠하는 식 (5)와 $\frac{dA}{dx} = -\frac{\omega}{2cQ}A$ 로부터 유도

된다.

$$A(x) = A_0 \exp\left[-\frac{\omega x}{2cQ}\right] \quad (6)$$

지수함수 적으로 감소하는 값 $A(x)$ 로부터, 식 (6)을 이용하여 공간적인 Q 의 값을 Fig. 3과 같은 형태로 정의할 수 있다. 물론 기하학적 확산효과에 의해 발생하는 공간적인 감쇠는 균질한 매질 내에서의 평면파 전파라는 범위로 한정하고, 불균질한 매질에 의한 기하학적인 분산 효과와 (5)식에 의한 Q 와 (6)식에 의한 Q 사이의 차이를 고려해야 한다. 이러한 분산의 추가적인 효과는 표면파와 관계되어 있는데, $e^{i(kx - \omega t)}$ 와 같은 파해(wave solution)에 대한 감쇠 효과를 획득하기 위하여, 시간적인 Q 를 측정하기 위한 실험은 복소 주파수에 의한 ω 로 대체할 수 있음을 고려해야 하고, 공간적인 Q 를 측정하기 위한 실험은 복

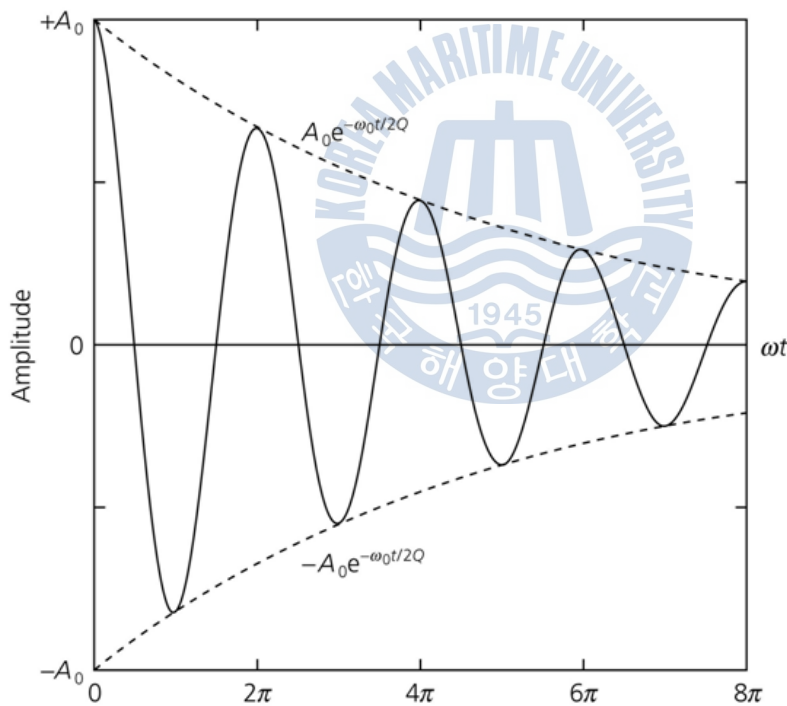


Fig. 3 Wave amplitude for a attenuated harmonic oscillator

소 파수에 의한 k 로 대체할 수 있음을 고려해야 한다. 시간적인 Q 의 경우, ω 는 $-\frac{i\omega}{2Q^{temporal}}$ 의 허수부에서 구할 수 있고, 공간적인 Q 의 경우, k 는 $-\frac{i\omega}{2Q^{spatial}}$ 의 허수부에서 구할 수 있다.

앞에서 유도한 매질 내에 저장된 최대 응력 에너지로부터 구한 진폭 감쇠현상을 Töksöz 등(1979)에 의해 제안한 Spectral ratio method로 진폭 감쇠현상을 도출하기 위하여 뉴턴의 제 2법칙($F=ma$)과 감쇠조화진동($F=-ku$)으로부터 고유감쇠가 발생하는 메커니즘으로 표현하여 아래 식(8)과 같이 나타낼 수 있다. 이 때, k 는 스프링 상수이고, u 는 평형상태 시 변위이다.

$$F=ma=m\frac{d^2x}{dt^2}=-ku \quad (8)$$

감쇠가 일어나지 않는 조화진동의 경우 식 (9)와 같이 2계 미분방정식의 일반해 형태로 표현하며,

$$m\frac{d^2u(t)}{dt^2}+ku(t)=0 \quad (9)$$

이를 아래의 식(10)과 같이 무한 조화진동의 형태로 표현한다.

$$u(t)=Ae^{iw_0t}+Be^{-iw_0t} \quad (10)$$

위 식 (10)에서 매질의 입자가 진동할 때의 자연 주파수(natural frequency)는 각속도 $w_0=(k/m)^{1/2}$ 이다. 반대로 감쇠가 발생하는 경우, 순간적인 입자의 운동과 반대방향인 복원력(restoring forth)이 매질 내의 속도 $\frac{du(t)}{dt}$ 에 비례한다

고 가정하면,

$$m \frac{d^2 u(t)}{dt^2} + \gamma m \frac{du(t)}{dt} + ku(t) = 0 \quad (11)$$

위 식 (11)에서 γ 는 감쇠인자로써, **Quality factor**인 $Q = \frac{\omega_0}{\gamma}$ 로 정의한다.

$$\frac{d^2 u(t)}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q} \frac{du(t)}{dt} + \omega_0^2 u(t) = 0 \quad (12)$$

위 식 (12)을 복소 지수함수의 실수부로 대체하면,

$$u(t) = A_0 e^{ipt} \quad (p \text{는 복소수})$$

$$u(t) = A_0 e^{i(\omega_0 t + i b t)} = A_0 e^{-bt} e^{i\omega_0 t} = A_0 e^{-\omega_0 t / 2Q} \cos(\omega_0 t) \quad (13)$$

식 (13)에서 실수부는 감쇠하고 허수부는 진동하며, Fig. 3과 같이 실수부는 포락선이나 전체 진폭의 감쇠를 나타낸다. 위 식 (13)에 상수인 파수(wave number, k)와 시간 t 대신 $(t - \frac{x}{v})$ 를 대입하여, $x > 0$ 인 위치의 운동을 표현하는 함수의 형태로 구할 수 있다. 이때, 파수를 복소함수의 형태인 $k = k_n + i\alpha$ 으로 대입하면,

$$A(x, t) = e^{i(\omega t - kx)} = e^{-\alpha x} e^{i(\omega t - k_n x)} \quad (14)$$

고유감쇠를 표현하는 식 (14)로 나타내어 이를 기하학적 확산손실 효과와 함께 표현하면, 아래 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$A_n(f) = G_n(f, x) e^{-\alpha_n x} e^{i(2\pi f t - k_n x)} \quad (15)$$

Spectral ratio method를 실내분석방법으로 적용할 경우, 기준 시료로는 Q 와 감쇠계수에 대하여 기존에 이미 연구되어있고, 감쇠가 거의 발생하지 않는 알루미늄(aluminium)을 사용한다. Fig. 4와 같이 알루미늄은 주파수 변화에 따라 Q 의 값이 140,000에서 240,000까지 범위를 가지고 있다(Zamanek & Rudnick, 1961). 일반적으로 **Spectral ratio method**에서 알루미늄의 Q 는 200,000의 값을 사용한다. 또한 비교 시료의 모양과 측정조건 등을 동일하게 일치시켜 기준 시료의 진폭에 대한 비교 시료의 진폭의 비를 측정하는 방법이다. 또한 두 시료의 모양과 측정 조건이 같으므로 기하학적 확산손실 효과를 동일량으로 취급하여 계산하게 된다. 감쇠효과에 의한 진폭은

$$A_r(f) = G_r(f, x) e^{-\alpha_r x} e^{i(2\pi f t - k_r x)} : \text{(reference)} \quad (16)$$

$$A_s(f) = G_s(f, x) e^{-\alpha_s x} e^{i(2\pi f t - k_s x)} : \text{(sample)} \quad (17)$$

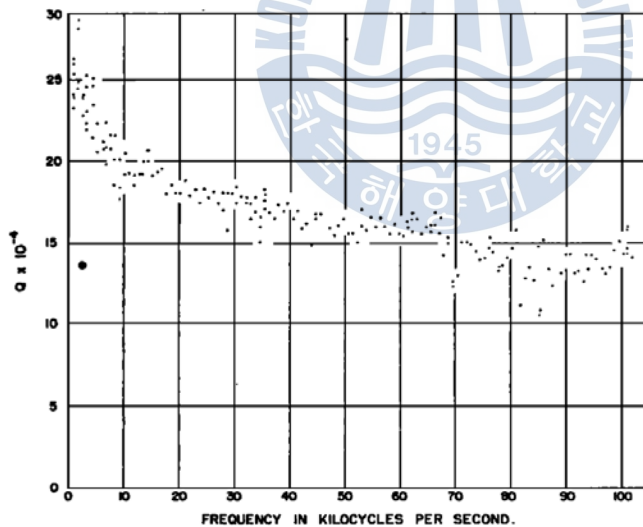


Fig. 4 Q for longitudinal mode resonances of a 24 ST aluminium rod

로 표현되며, 여기에서 A 는 진폭, f 는 주파수, x 는 시료의 길이 혹은 거리, k ($k=2\pi f/v$)는 파수, v 는 위상 속도, $G(f,x)$ 는 기하학적 확산효과에 관한 인자, 그리고 α 는 주파수에 따른 감쇠계수이다. 첨자 r 과 s 는 각각 기준 시료와 비교 시료를 의미한다. 식 (16)을 식 (17)로 나누어 진폭의 비율을 표현하면,

$$\frac{A_r}{A_s} = \frac{G_r}{G_s} e^{-(\alpha_r - \alpha_s)x} \quad (18)$$

$$\ln\left(\frac{A_r}{A_s}\right) = \ln\left(\frac{G_r}{G_s}\right) + (\alpha_s - \alpha_r)x \quad (19)$$

로 정리되며, 식 (19)는 식 (18)에 자연대수를 적용한 것이다. 그리고 주파수의 선형 함수인 감쇠계수는 식 (20)과 같이 1차식으로 표현되며,

$$\alpha(f) = \gamma f \quad (20)$$

γ 는 감쇠계수와 관계를 가지는 상수로써, Q 와는 다음과 같은 관계식을 가진다.

$$Q = \frac{\pi}{\gamma v} \quad (21)$$

식 (19)와 식 (20)을 다시 정리하면, 다음과 같은 최종적인 관계식을 얻게 된다.

$$\ln\left(\frac{A_r}{A_s}\right) = (\gamma_s - \gamma_r)xf + \ln\left(\frac{G_r}{G_s}\right) \quad (22)$$

여기서 G_r 과 G_s 는 기하학적 확산 인자로써 주파수에 영향을 받지만, $\ln\left(\frac{G_r}{G_s}\right)$

는 기하학적 보정량으로 상수로 남게 되어 주파수에 독립적인 축척계수이다. 또한 시료의 길이 혹은 거리 x 역시 상수이다. 따라서 식 (22)는 다음과 같은 일반적인 1차함수의 형태를 취하게 된다.

$$y = ax + b \quad (23)$$

진폭 스펙트럼을 구하여 그 비율에 대한 자연대수를 취한 값 $\ln(\frac{A_r}{A_s})$ 와 주파수 f 의 관계를 최소자승법에 의한 1차회기방정식인 식 (23)을 구하면 그 기울기 a 는 $(\gamma_s - \gamma_r)$ 값이 된다.



제 3 장 탄성과 감쇠 실험 및 적용

3.1. 탄성과 감쇠 축소모형실험

3.1.1 탄성과 감쇠 축소모형실험 구성

탄성과 축소모형실험은 탄성과 전파현상의 규명, 음원 및 수신기의 다양한 배열과 지하지질구조에 따른 탄성과 진폭 등의 반응을 파악함으로써 탄성과 탐사자료를 보다 정량적으로 해석하기 위해 이용되어 왔다. 이러한 축소모형실험은 실제 탄성과와 매질을 이용함으로써 수치모형실험의 단점을 보완할 수 있다(신성렬 등, 2001). 탄성과 축소모형실험은 음원과 수신기의 공간 위치, 모델의 기하학적 구조 및 지질모델의 매질 등의 여러 가지 제한이 있지만 축소모형실험에 의해서 획득한 자료는 신뢰성이 높으며 이벤트의 상대진폭(relative amplitude)을 이용하여 매질의 특성을 파악할 수 있다(신성렬 등, 2006).

본 연구에서는 Toksöz 등이 실내시험분석방법으로 제안한 Spectral ratio method를 이용하여 축소모형실험을 수행하였고, 이를 통해 Johnston이 선행 연구한 자료와 비교하여 Q 를 산출하는 방법에 대하여 검증하였다. 또한 기하학적 확산손실과 외부감쇠의 영향을 최소한으로 하여, 탄성과의 감쇠특성을 분석하기 위해 시료의 크기와 측정 조건을 동일하게 부여하여 축소모형실험을 실시하였다.

탄성과 축소모형실험에 있어 사용되는 통상적인 재료는 합성수지, 금속재료, 고무재료 등이 있는데, 본 연구에서는 공업용 플라스틱 재료와 금속재료를 사용하였고, 음원으로는 중심 주파수가 1MHz의 트랜스듀서인 Panametrics사의 V103(P파)을 사용하였다. 또한 탄성과 속도를 측정하고 모니터링할 수 있는 장치를 고안하였다. 이때 매질과 트랜스듀서간의 커플링을 향상시키고, 이 실험의

목적에 맞게 제작된 클램프를 이용하여 매질에 가해지는 하중을 일정하게 부여하고 이를 유지할 수 있도록 로드셀을 장착하여 이를 확인하고, 탄성과 속도 측정 시 취득하는 자료의 정확성을 향상시켰다. 로드셀(load cell)은 최대 측정 하중 50kgf인 SENSTECH사의 SCMM2-50K를 사용하였다.

탄성과 축소모형실험장치는 Fig. 6에 나타난 바와 같이 모든 장치를 통제할 수 있는 개인용 컴퓨터와 신호의 발신 및 수신을 제어하는 Pulser / Receiver, 초음파 탐촉자 역할을 하는 트랜스듀서, 실제 지하지질구조를 모사한 모델과 취득한 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환시켜 주는 장치로 구성되며 Fig. 5에 나타내는 흐름에 따라 운용된다(하영수 등, 2011). 본 시스템의 주목적은 탄성과 속도 측정이지만 속도측정을 위한 신호파형이 시스템 자체에 내장되므로 이 신호파형을 이용하게 되면 탄성과 감쇠 특성을 계산 할 수 있다.

현장에서의 탐사 영역크기와 실내에서 수행하는 축소모형실험 간에는 크기의 차이라는 점이 반드시 고려되어야 할 사항이므로 축소모형을 제작한 다음 지질 모델의 크기, 구조 및 물성이 실제의 현장상황을 정확히 반영할 수 있어야 한다(신성렬 등, 2001). 고려할 수 있는 축소비(scale factor)는 3가지로 속도변수(a_c), 모델의 크기 변수(a_λ), 주파수 변수(a_f)이며 이 3가지는 다음 식 (24)와 같은 조건을 만족하여야 한다(Vogel et al., 1985).

$$a_c = a_f \cdot a_\lambda \quad (24)$$



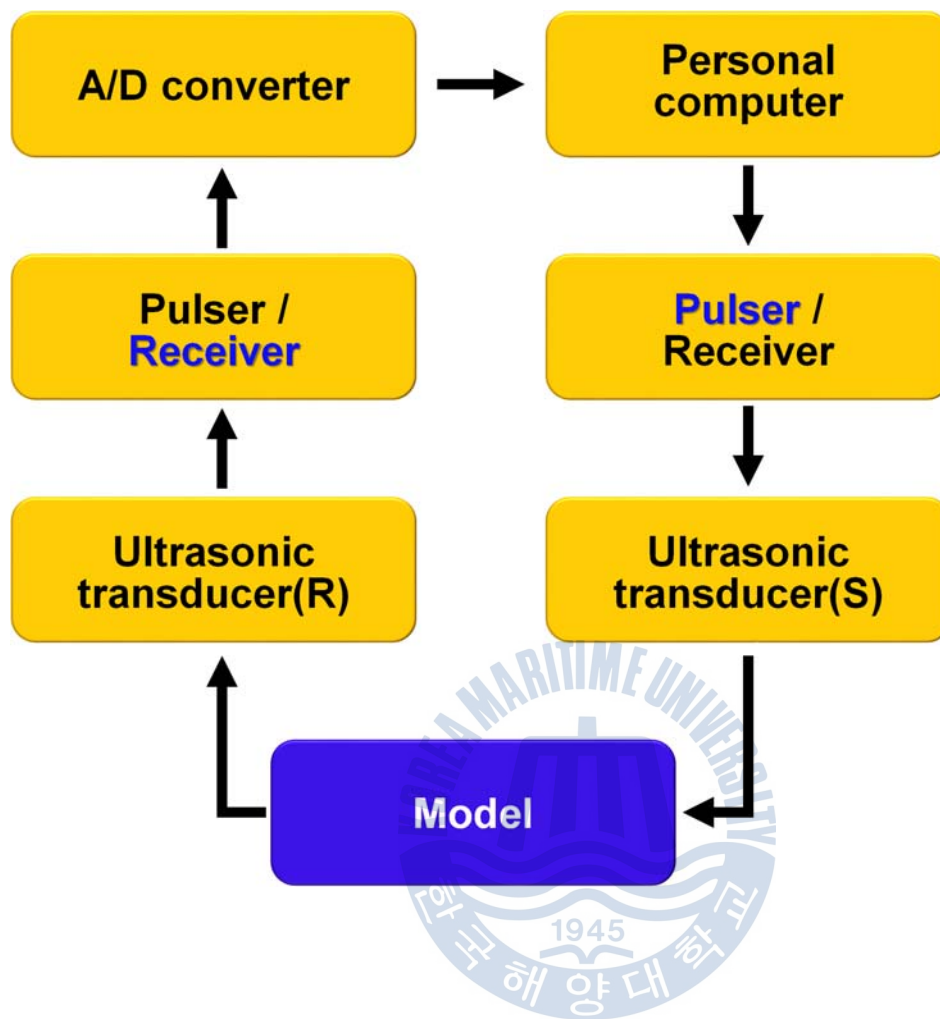


Fig. 5 A flow chart of the data acquisition procedure



Fig. 6 (a)sample holder, (b)personal computer, (c)load cell, (d)indicator, (e)Transducer, (f)pulser-receiver, (g)models and (h)A/D converter

3.1.2 탄성과 감쇠 축소모형실험 방법

본 연구에서 필요한 감쇠계수 정보 취득에 적합한 매질을 선정하여 Fig. 7에서 나타난 시료의 속도정보 및 감쇠계수를 파악하여 **Quality factor**를 산출하였다. Table 1은 여러 가지 매질에 대한 탄성과 속도와 **Quality factor** Q 의 값들을 요약 정리한 자료이다(Johnston, 1981). Q 가 클수록 전달에너지의 감쇠량이 적은 매질을 의미하며, 반대로 Q 가 작으면 에너지가 많이 감쇠하는 매질이다.



Fig. 7 (a)reference sample(aluminium) and (b)engineering plastic sample(acrylic)

순수한 물 다음으로 알루미늄이 200,000 정도의 가장 큰 Q 를 보이고 있음을 알 수 있다. 순수한 물의 Q 가 높기 때문에 기준 시료로 적합하지만 실험에 적용하기 어렵고 온도에 민감할 뿐만 아니라, 기준 시료와 동일한 모양의 조건 하에서 신호파형을 구하기가 쉽지 않다. 따라서 **Spectral ratio method**를 실내 분석방법에 적용하기 위해 실험에 사용된 기준 시료는 정방형(3cm)으로 제작된 금속재료인 알루미늄 괴를 선택하였으며, 마찬가지로 동일한 크기와 모형의 주조가공으로 제작된 아크릴(Plexiglass³)을 비교 시료로 사용하였고, 시료의 기본 물성은 Table 2와 같다. Fig. 8(a)와 같이 본 실험을 위해 자체 제작한 클램프에 P와 트랜스듀서를 장착하고 Fig. 8(b)와 (c)와 같이 알루미늄과 아크릴 시료를 각각 고정시킨 후, 탄성과 투과실험(transmission experiment)을 통해 각 시료의 X, Y, Z축에 대하여 속도정보 및 진폭 신호를 취득하였다.

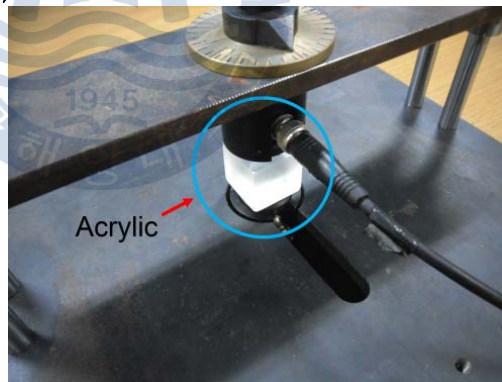
탄성과 속도는 시간과 거리의 함수이므로 정밀한 시료의 길이 측정과 신호 파형의 최초 신호(first break point)의 정확한 선택이 측정오차를 결정하게 된다. 기준 시료와 비교 시료를 제작하는 과정에서 미세하지만 약간씩 길이의 차이가 있고, 시료의 각 면이 완벽하게 평면이 아니기 때문에 트랜스듀서를 매질에 접촉시킬 때 발생하는 커플링 문제로 인한 측정 오차를 최대한 줄이고 실험의 정확성을 향상시키기 위해 자체 제작한 클램프와 로드셀을 이용하여 이를 보정하였다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 8 (a)The apparatus used for the transmission experiments using
(b)aluminium and (c)acrylic

Table 1 Q and velocity for reference materials(Johnston, 1981)

Materials	Q	V(km/sec)	Mode	Frequency range
Aluminium	200,000	5.00	Longitudinal resonance	1 to 200 kHz
Copper				
unannealed	2,180	3.81	Longitudinal resonance	2.5 to 30 kHz
annealed	5,830	5.01	P-wave pulse	35 to 75 MHz
Lead	36	1.21	Longitudinal resonance	1.6 to 15 kHz
Magnesium	965	5.77	P-wave pulse	7 to 76 kHz
Nickel	980	4.90	Flexural resonance	12 to 33 Hz
Steel	1,850	5.20	Flexural resonance	2 to 8 Hz
Plexiglas ³	20	2.59	Longitudinal resonance	10 kHz
Brass	655	3.48	Flexural resonance	-
Celluloid	7	2.81	Flexural resonance	0.5 to 18 kHz
Polystyrene	240	2.24	Longitudinal resonance	20 to 60 kHz
Lucite ²	23	2.11	Longitudinal resonance	1 kHz
Glass(Pyrex)	1,860	5.17	Longitudinal resonance	10 kHz
Air				
Dry	3,485	0.343	Resonance	10 kHz
Humidity(100%)	1,434	0.345	Resonance	10 kHz
Water				
fresh(17°C)	210,000	1.48	Resonance	100 kHz
brine(36ppm)	63,000	1.52	Resonance	150 kHz

3.1.3 탄성과 감쇠 축소모형실험 결과

탄성과 투과시험을 통해 정방형의 시료 각 축에 대한 기준 시료와 비교 시료의 속도정보를 추출하고 이로부터 파가 시료를 전파하는 동안 발생한 감쇠효과를 파악하는 실험결과는 아래와 같다. **Spectral ratio method**를 사용할 때, 기준 시료인 알루미늄의 Q 를 알고 있으므로 비교 시료인 γ_s 의 Q 를 구할 수 있다. 기준 시료인 알루미늄의 탄성과 속도는 약 $6400m/s$ 이고 Q 가 200,000임을 알고 있으므로 식 (21)을 이용하여 γ_r 을 계산해 보면 약 2×10^{-9} 정도임을 알 수 있다. 비교 시료에 비해 기준 시료의 Q 가 매우 크고, 반대로 γ_r 의 값은 무시할 수 있을 정도로 매우 작으므로 자연대수를 취한 진폭 스펙트럼과 주파수의 관계에 의하여 비교 시료의 γ_s 값을 직접적으로 산출할 수 있게 된다. 이러한 관계에 따라 아크릴의 γ_s 값은 각 축에 대하여 1.6×10^{-3} 에서 1.7×10^{-3} 의 값을 가지게 되며, Q 는 20에서 21정도의 값을 가진다. 따라서 기준 시료에 대한 비교 시료의 γ 비율은 약 10^{-6} 이므로 기준 시료를 알루미늄으로 사용할 경우 γ_r 은 0으로 처리하여도 무관함을 알 수 있다(Toksöz et al., 1979; Sears & Bonner, 1981).

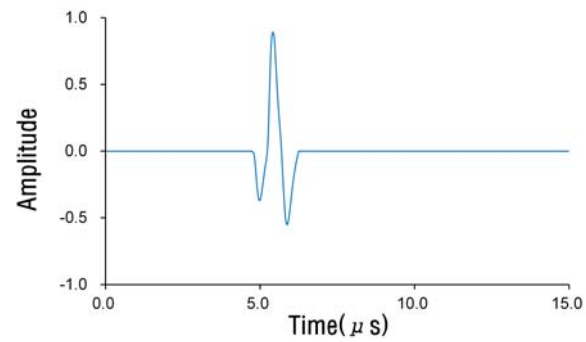
진폭 스펙트럼을 구하는데 있어서 탄성과 신호의 첫 신호점에서 어느 부분까지의 신호를 사용해야 할 것인가를 결정해야한다. 트랜스듀서 사이의 정방형 시료 내에서 에너지의 전달은 여러 번의 반사와 굴절을 반복할 것이므로 일정 시간 이후의 탄성과 신호는 잡음이 섞이거나 변형된 형태일 것이다.

Fig. 9 (a)와 (b)는 감쇠계수 계산에 적용된 기준 시료 알루미늄과 비교 시료 아크릴 x 축에 대한 각각의 첫 신호점에서 약 $2\mu s$ 동안의 1MHz 탄성과 신호를 보여주고 있으며, Fig. 10 (a)는 초동 신호에 대한 고속 푸리에 변환 방법으로 진폭 스펙트럼을 구한 결과이다. 아크릴에서 보다 알루미늄에서 훨씬 큰 진폭 스펙트럼 값을 보이고 있으며, 식 (22)를 적용하여 최소자승법에 의한 주파수 변화에 따른 $\ln(A_r/A_s)$ 의 관계곡선과 1MHz를 중심으로 비교적 선형관계를 보이는 부분에서 1차회기방정식을 구한 결과가 Fig. 10 (b)이다. Fig. 11 (a)와 (b)는 감쇠계수 계산에 적용된 기준 시료 알루미늄과 비교 시료 아크릴 y 축

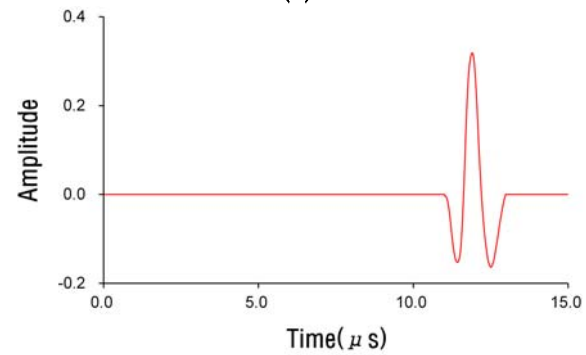
에 대한 각각의 첫 신호점에서 약 $2\mu s$ 동안의 $1MHz$ 탄성과 신호를 보여주고 있으며, Fig. 12 (a)는 초동 신호에 대한 고속 푸리에 변환 방법으로 진폭 스펙트럼을 구한 결과이다. 아크릴에서 보다 알루미늄에서 훨씬 큰 진폭 스펙트럼 값을 보이고 있으며, 식 (22)를 적용하여 최소자승법에 의한 주파수 변화에 따른 $\ln(A_r/A_s)$ 의 관계곡선과 $1MHz$ 를 중심으로 비교적 선형관계를 보이는 부분에서 1차회기방정식을 구한 결과가 Fig. 12 (b)이다. Fig. 13 (a)와 (b)는 감쇠 계수 계산에 적용된 기준 시료 알루미늄과 비교 시료 아크릴 z 축에 대한 각각의 첫 신호점에서 약 $2\mu s$ 동안의 $1MHz$ 탄성과 신호를 보여주고 있으며, Fig. 14 (a)는 초동 신호에 대한 고속 푸리에 변환 방법으로 진폭 스펙트럼을 구한 결과이다. 아크릴에서 보다 알루미늄에서 훨씬 큰 진폭 스펙트럼 값을 보이고 있으며, 식 (22)를 적용하여 최소자승법에 의한 주파수 변화에 따른 $\ln(A_r/A_s)$ 의 관계곡선과 $1MHz$ 를 중심으로 비교적 선형관계를 보이는 부분에서 1차회기 방정식을 구한 결과가 Fig. 14(b)이다. 여기서 구한 기울기는 식 (22)의 $(\gamma_s - \gamma_r)x$ 에 해당된다. 앞에서 언급한 바와 같이 γ_r 은 무시할 수 있고, 시료의 길이 x 를 소거하면 γ_s 값을 구할 수 있게 되는데, 이것을 식 (20)에서 감쇠계수 α 를, 측정된 탄성과 속도와 함께 식 (21)에서 Q 를 얻게 된다. 이에 대한 결과는 Table 2에 나타내었다. Table 1에서 Johnston(1981)이 측정한 아크릴 (Plexiglas³)의 Q 와 본 연구에서 측정한 아크릴의 Q 가 거의 유사함을 보아 Spectral ratio method를 이용한 Q 산출이 타당함을 확인 할 수 있다.

Table 2 Experimental result of p-wave velocity, attenuation coefficient and Q values dependant axis

	X-axis	Y-axis	Z-axis
v	6467.5671	6395.5059	6394.9628
γ	0.0017	0.0016	0.0016
Q	20.2906	21.7545	21.4202

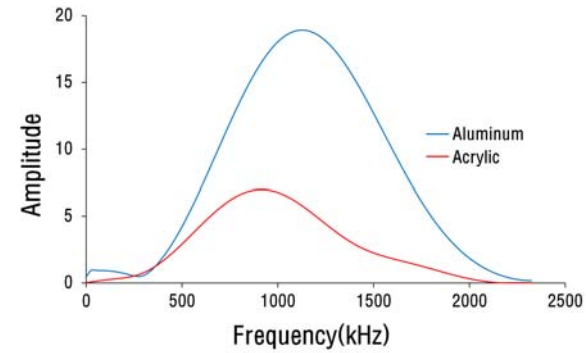


(a)

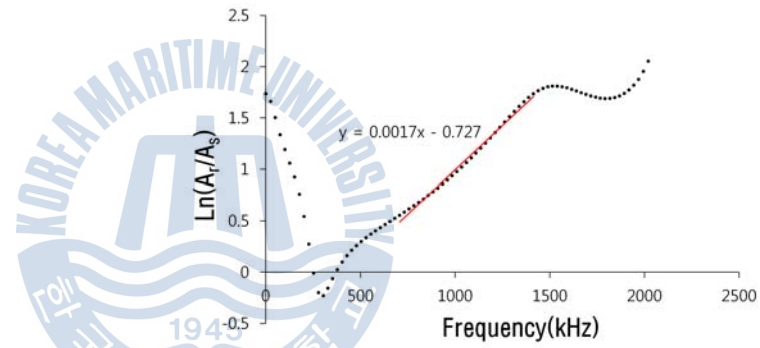


(b)

Fig. 9 Time domain waveform of (a)aluminum and (b)acrylic for X axis

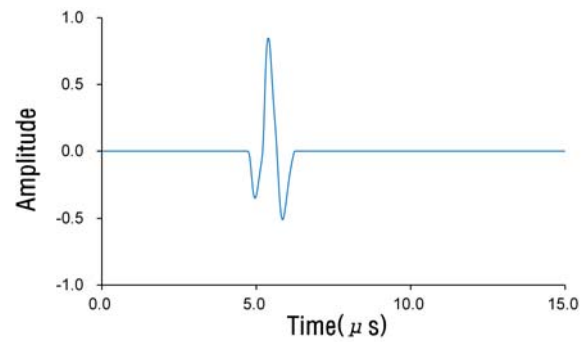


(a)

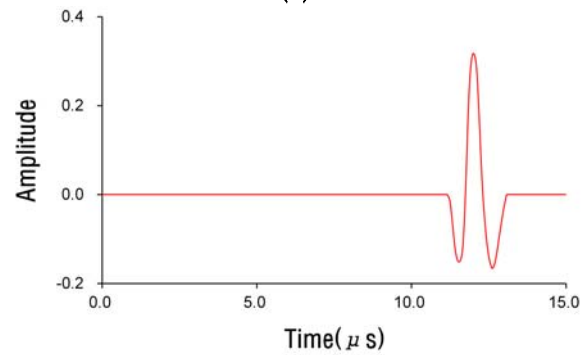


(b)

Fig. 10 (a)The spectral amplitudes of aluminium and acrylic resulting from Fast Fourier transform and (b)The spectral ratios for the line of best fit for X axis

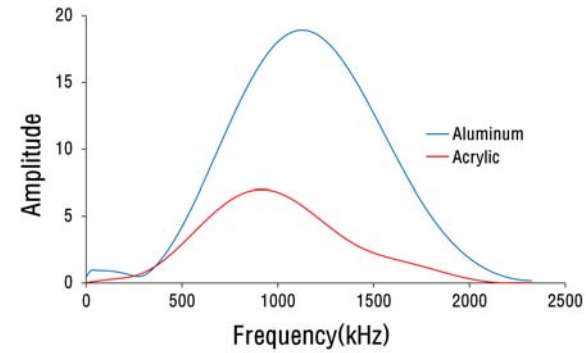


(a)

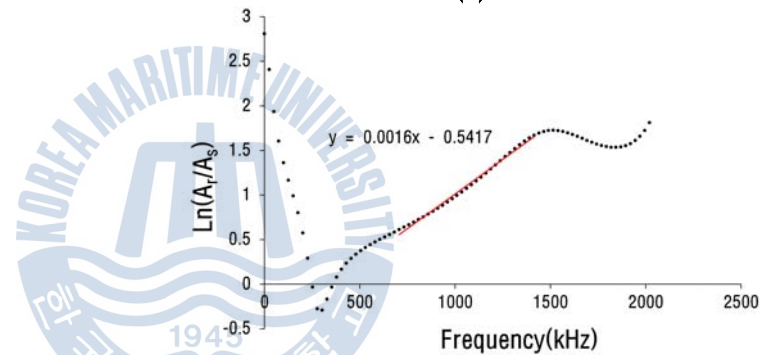


(b)

Fig. 11 Time domain waveform of (a)aluminum and (b)acrylic for Y axis

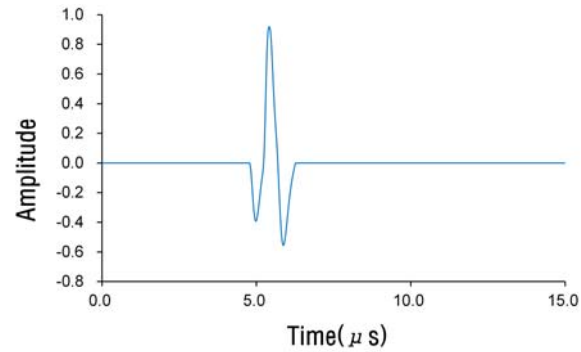


(a)

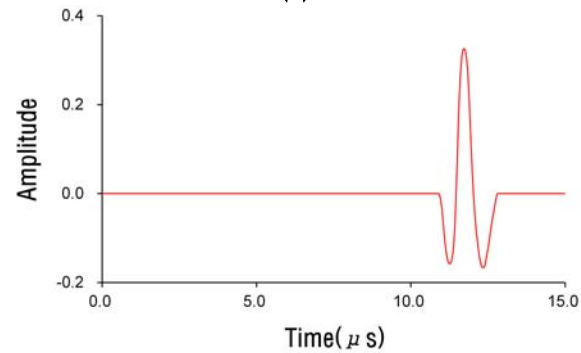


(b)

Fig. 12 (a)The spectral amplitudes of aluminium and acrylic resulting from Fast Fourier transform and (b)The spectral ratios for the line of best fit for Y axis

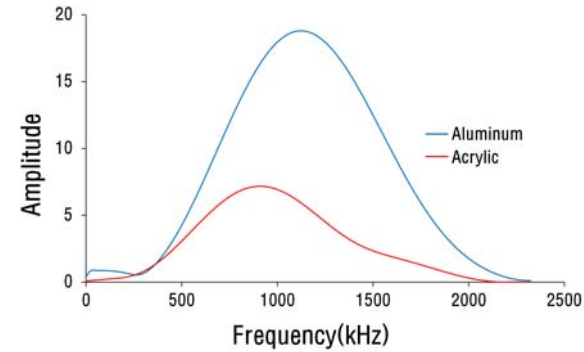


(a)

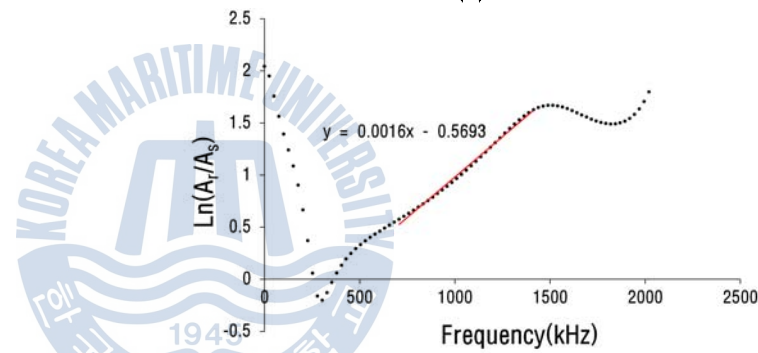


(b)

Fig. 13 Time domain waveform of (a)aluminum and (b)acrylic for Z axis



(a)



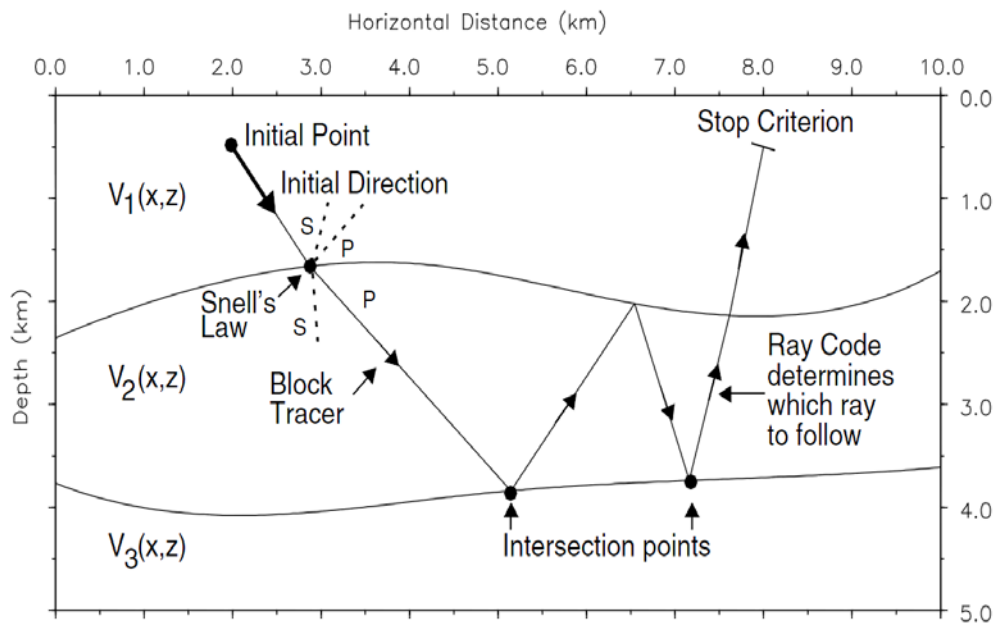
(b)

Fig. 14 (a)The spectral amplitudes of aluminium and acrylic resulting from Fast Fourier transform and (b)The spectral ratios for the line of best fit for Z axis

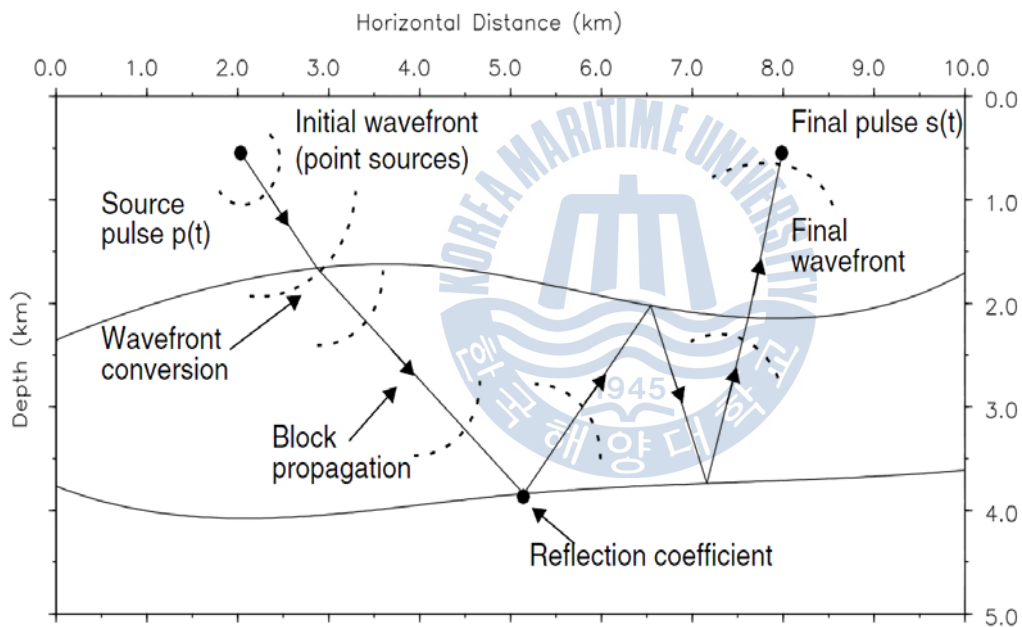
3.2 탄성과 감쇠 수치모형실험

3.2.1 탄성과 감쇠 수치모형실험 구성

본 연구의 수치모형실험에 사용된 프로그램인 NORSAR-2D는 파선추적 알고리즘(ray-tracing algorithm)을 기반으로 한 탄성과 모델링 시스템으로써, 파선추적 알고리즘은 주어진 속도 모델에서 음원으로부터 수신기까지 도달하는 파의 경로(ray path) 및 도달 시간(travel time)을 스넬의 법칙(Snell's law)이나 또는 페르마의 원리(Fermat's principle)를 이용하여 결정하는 하는 것으로, 층서구조를 주행하는 탄성과 전파 과정을 계산하기 위한 알고리즘이다. 이 프로그램에서 구현된 탄성과의 이론적 배경으로 기하학적 파(geometrical rays)인 반사와 투과파는 각 층간 경계에서 발생하는 반사와 투과의 기하학적 법칙을 따르고, 층간 교차지점에서 발생하는 굴절파는 Keller의 법칙을 따른다. 또한 기하학적 파선추적은 Fig. 15(a)에 나타난 운동학적 파선추적(kinematic ray tracing)과 Fig. 15(b)에 나타난 역학적 파선추적(dynamic ray tracing) 두 부분으로 분류한다. 운동학적 파선추적은 파선의 주행시간과 파선경로의 위치에 따라 계산하게 되고, 모델 블록 내에서 파의 모드에 따른 P파와 S파의 파속만을 필요로 한다. 역학적 파선추적은 파선의 기하학적 확장 요소, 파면의 곡률 그리고 진폭 계수에 따라 파동장의 역학적 요소를 계산하게 된다. 또한 지층의 속도 뿐만 아니라 밀도, P파와 S파의 Quality factor 등을 입력하여 수치모델로 구현할 수 있고, 실제 탄성과의 운동역학적 거동과 관련된 반사계수, 투과계수, 기하학적 확산효과, 비탄성 감쇠 등에 따라 탄성파가 지층을 주행하면서 발생하는 진폭의 변화를 구현 할 수 있다.



(a)



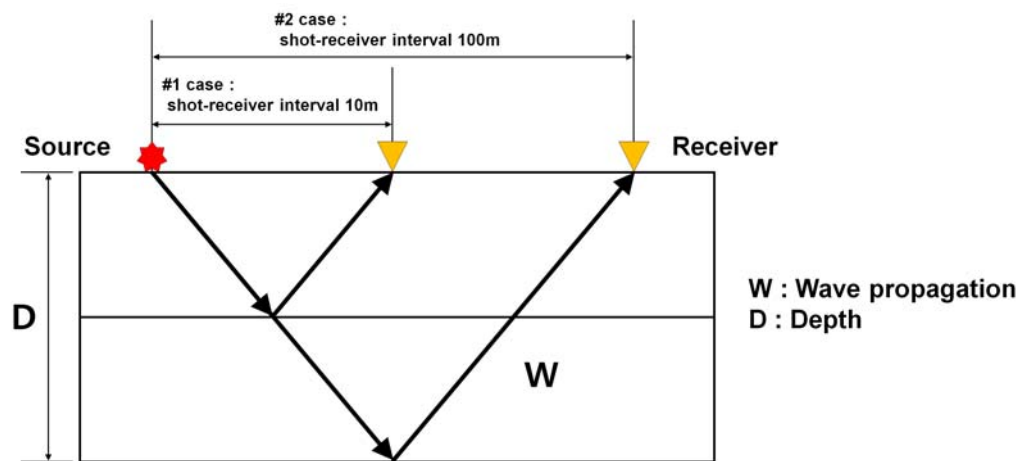
(b)

Fig. 15 (a)Elements of kinematic ray tracing and (b)elements of dynamic ray tracing

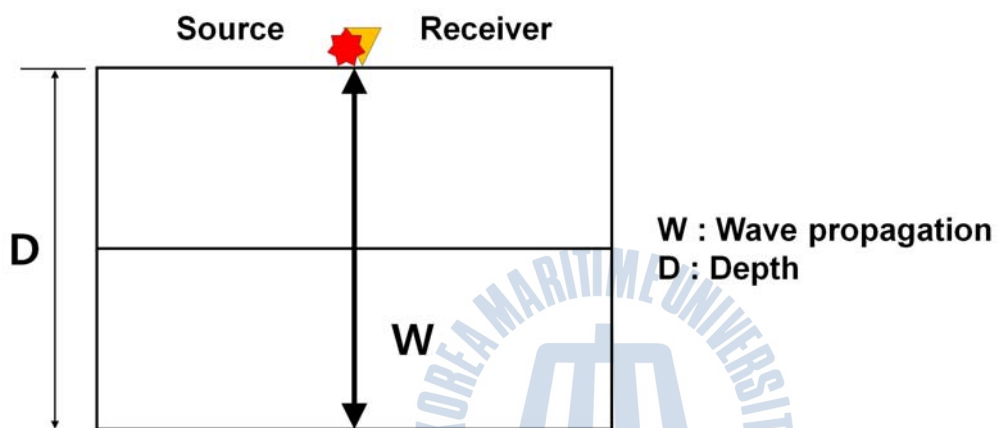
3.2.2 탄성과 감쇠 수치모형실험 방법

본 실험에서는 수평모델에 대하여 Fig 16과 같이 탄성과 반사법(reflection survey)과 수직입사(normal incidence survey) 탐사를 통해 음원의 중심 주파수와 수진기의 배열에 따른 탄성과 P파의 지층간 감쇠 영향에 대한 수치모형실험을 수행하였다. 또한 축소모형실험에서는 주로 고유감쇠의 영향을 확인하기 위해 Spectral ratio method를 실내시험방법으로 적용한 것에서 추가적으로 기하학적 확산손실 및 추가적인 감쇠의 영향을 부여하고, 실제 현장과 같은 보다 확장된 형태로 적용하여 Q 의 산출이 가능한지 확인하였다. 특정한 기준 시료를 설정하지 않고, 각 지층의 상·하부 경계에서 발생한 반사 이벤트를 기준면과 비교면으로 설정하여 Spectral ratio method를 적용하였다.

수치모형은 총 4개로 속도, 밀도, Q 등 여러 가지 물리적 요소를 변화시켜 수직입사 탐사와 반사법 탐사를 실시하였고, 반사법 탐사의 경우 음원과 수진기의 간격은 각각 10m와 100m로 설정하였다. Fig 17에 나타난 1번 모델은 지층 모델의 심도에 깊어짐에 따라 Q 가 감소하는 모델로, 중심 주파수 50Hz의 음원을 사용하였다. 반사법 탐사의 경우 수진기의 간격은 각각 10m와 100m일 때 거리에 따른 감쇠영향을 확인하였다. Fig 18에 2번 모델은 1번 모델과 탐사조건이 동일하나, 심도가 깊어짐에 따라 Q 가 증가하는 모델을 구성하였다. 3번 모델은 심도가 깊어질수록 Q 가 증가하는 형태의 모델을 구성하였고, 음원과 수진기 간격과 중심 주파수 50Hz와 100Hz의 두 종류의 음원을 사용한 경우에 따른 Q 변화 양상을 관찰하였다. 4번 모델은 심도가 깊어질수록 Q 가 증가하는 형태의 모델의 중간에 물리적 특성 변화가 두드러진 Q 역전층을 삽입하여, 진폭의 역전현상과 진폭변화를 통해 탄성파가 해당 지층 하부층을 전파할 때의 탄성과 자료에 대한 영향을 확인하였다.



(a)



(b)

Fig. 16 A schematic diagram of the experimental set-up for (a)reflection survey and (b)normal incidence survey

3.2.3 탄성과 감쇠 수치모형실험 결과

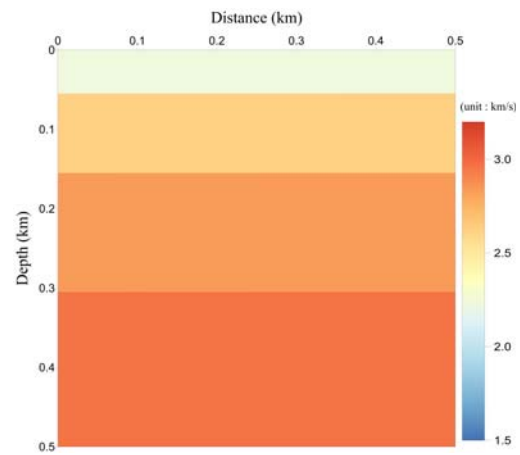
3.2.3.1 1번 모델

지층 심도가 깊어짐에 따라 Q 가 감소하는 1번 모델의 물성은 Fig 17에 나타내었다. Fig. 18(a)는 수직 입사 탐사의 결과로, 지층의 경계면에 대한 시간영역에서의 초동 신호를 보여주고 있으며, Fig. 18(b)는 초동 신호에 대한 고속 푸리에 변환 방법으로 진폭 스펙트럼을 구한 결과이다. 상부층에서 하부층으로 내려갈수록 기하학적 확산효과 및 투과, 반사효과 등에 의해 진폭 스펙트럼 값이 감소함을 보이고 있으며, Fig. 19(a)는 2층과 3층, Fig. 19(b)는 3층과 4층의 진폭 스펙트럼에 대하여 식 (22)를 적용하여 최소자승법에 의한 주파수 변화에 따른 $\ln(A_r/A_s)$ 의 관계곡선과 50Hz를 중심으로 비교적 선형관계를 보이는 부분에서 1차회기방정식을 구한 결과이며, Table 3에 나타내었다.

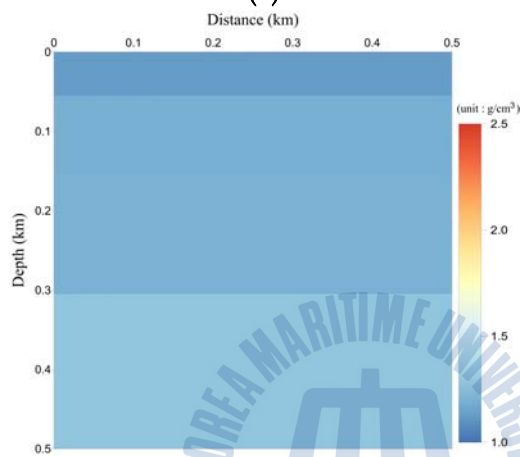
Table 3 Experimental result of attenuation coefficient and Q values in case of normal incidence survey model No. 1

	γ	theoretical Q	calculated Q
2층	0.0012	200	203.0725
3층	0.0022	150	152.8599

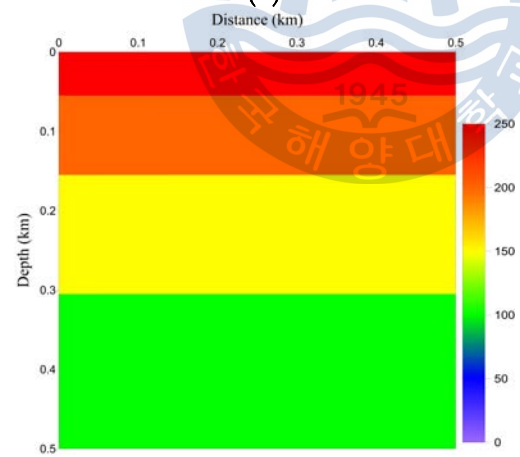
수직입사 탐사의 경우 수진기를 지표면에 위치하였기 때문에 1층의 반사 신호를 받을 수 없고, 2층, 3층, 반무한 층의 반사 신호만 취득할 수 있으므로 1층의 Q 를 도출 할 수가 없다. 그러나 2층과 3층에 대한 Q 의 오차율은 각각 약 1.9%와 1.5%정도로 확인되어 계산값과 모델의 이론값이 거의 유사함을 확인하였다.



(a)

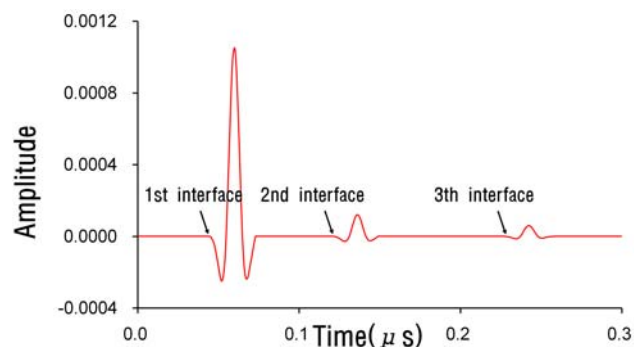


(b)

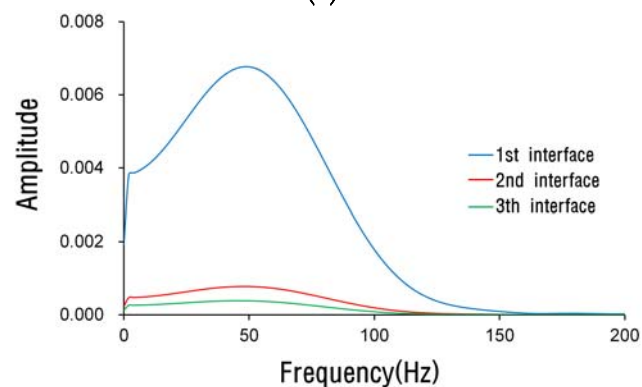


(c)

Fig. 17 A schematic of layered model No.1 with physical properties,
(a)velocity, (b)density and (c) Q value

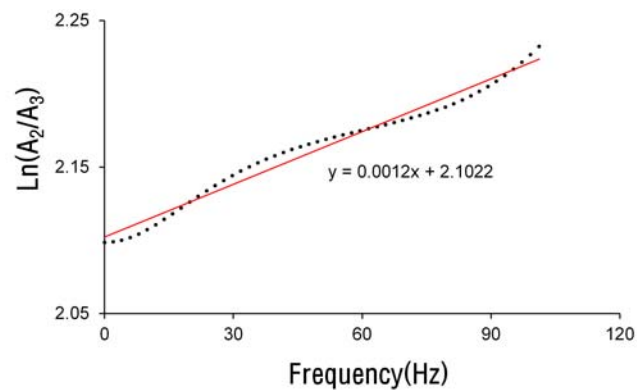


(a)

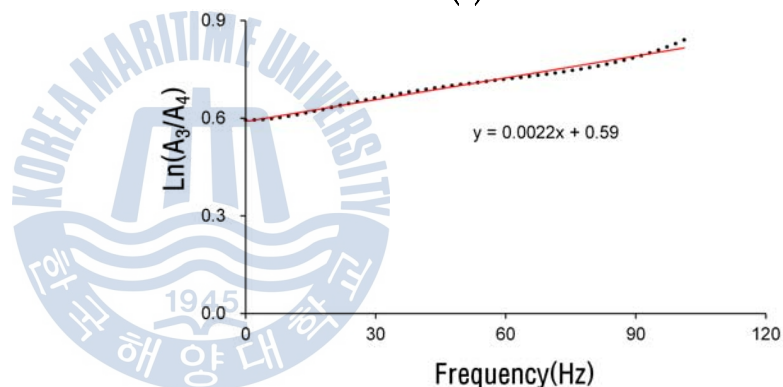


(b)

Fig. 18 (a)Time domain waveform and (b)the spectral amplitude of resulting from Fast Fourier transform for model No. 1



(a)



(b)

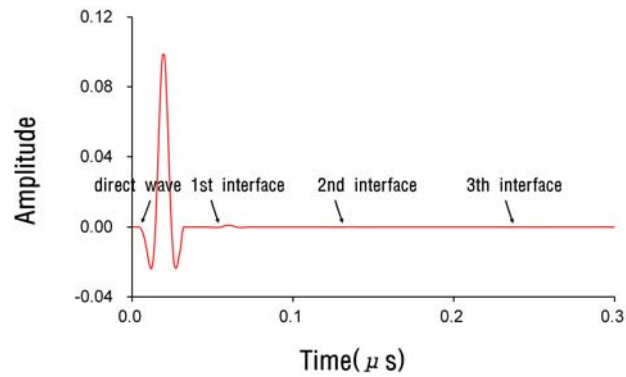
Fig. 19 The spectral ratios between layers and the line of best fit

Fig 20과 Fig 21은 중심 주파수 50Hz인 음원을 사용한 반사법 탐사의 결과이다. Fig. 20(a)는 음원과 수신기 간격이 10m, Fig. 21(a)는 음원과 수신기 간격이 100m일 때, 각층의 초동 신호를 측정한 결과이며, Fig. 20(b)와 Fig. 21(b)는 각 초동 신호에 대한 진폭 스펙트럼의 결과이다. Fig. 22(a)와 Fig. 23(a)는 두 개의 수신기를 이용하여 1층의 직접파(direct wave)를, Fig. 22(b)와 Fig. 23(b)는 2층과 3층, Fig. 22(c)와 Fig. 23(c)는 3층과 4층의 진폭 스펙트럼에 대하여 식 (22)를 적용 후 최소자승법에 의한 주파수 변화에 따른 $\ln(A_r/A_s)$ 의 1차회기방정식을 구한 결과이며, Table 4에 나타내었다. 음원-수진기 간격이 10m 일 때, 수치 모델의 이론값에 비교하여 2층과 3층의 계산값의 오차율은 약 0.1%, 0.7%였고, 음원-수진기 간격이 100m 일 때의 오차율은 약 0.6%, 1.5%로 나타났다. 이론값과 계산값이 큰 오차율을 보이는 것은 아니지만 음원-수진기의 간격이 멀어지게 되면, 동일한 지층의 경계와 매질을 전파하더라도 전파 거리, 전파 과정에서 발생하는 마찰열 등 여러 가지 감쇠손실 영향 중 기하학적 확산 손실과 고유감쇠의 영향이 보다 우세하게 나타나고, 투과나 반사 등에 의한 산란손실은 앞의 두 가지 요소보다 훨씬 적은 영향을 미친다고 판단된다.

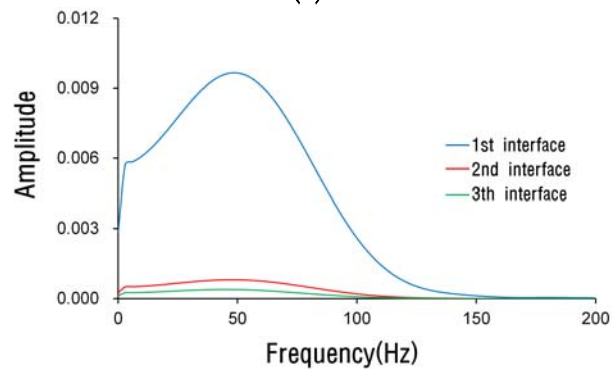
Table 4 Experimental result of attenuation coefficient and Q values for reflection survey model No. 1 in case of shot-receiver interval 10m and 100m

	10m			100m		
	γ	theoretical Q	calculated Q	γ	theoretical Q	calculated Q
1층	0.0006	250	281.3824	0.0006	250	232.8925
2층	0.0012	200	200.2375	0.0010	200	198.8952
3층	0.0022	150	151.0492	0.0021	150	152.2790

그러나 반사법 탐사를 적용하여도 1층의 Q를 직접적으로 구하기 어렵다. 따라서 1층의 Q를 도출하기 위해 각각의 수신기에 도달하는 직접파(direct wave)의 주행시간과 진폭을 계산하였다. 음원-수진기 간격이 10m 일 때, 수치

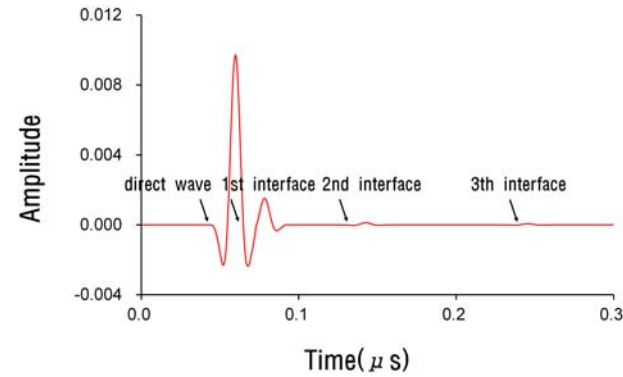


(a)

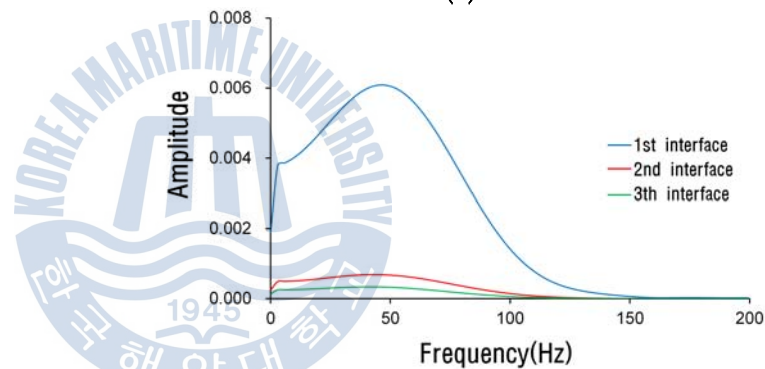


(b)

Fig. 20 (a)Time domain waveform and (b)the spectral amplitude of resulting from Fast Fourier transform for shot-receiver interval 10m



(a)



(b)

Fig. 21 (a)Time domain waveform and (b)the spectral amplitude of resulting from Fast Fourier transform for shot-receiver interval 100m

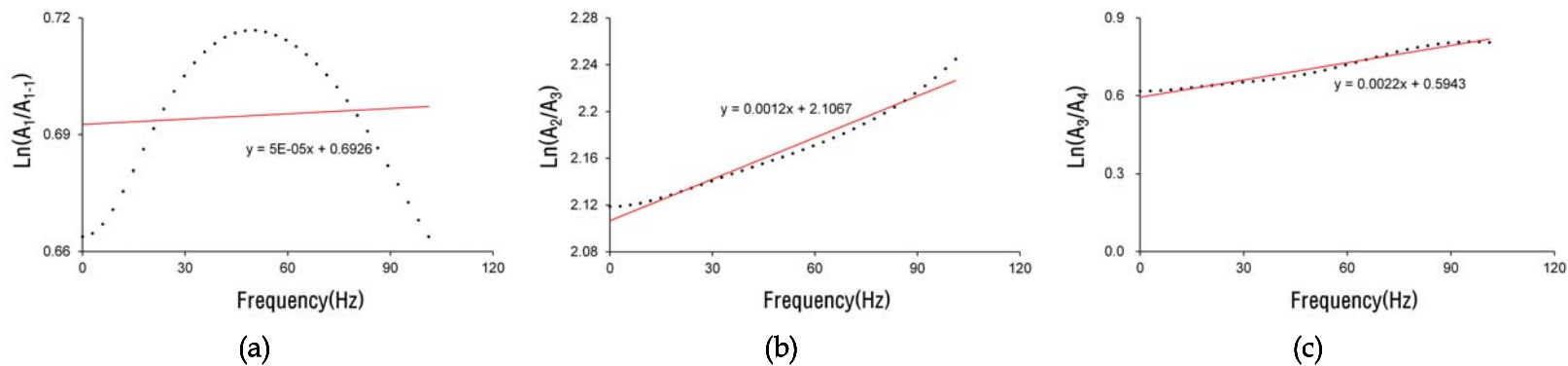


Fig. 22 The spectral ratios between layers and the line of best fit for shot-receiver interval 10m

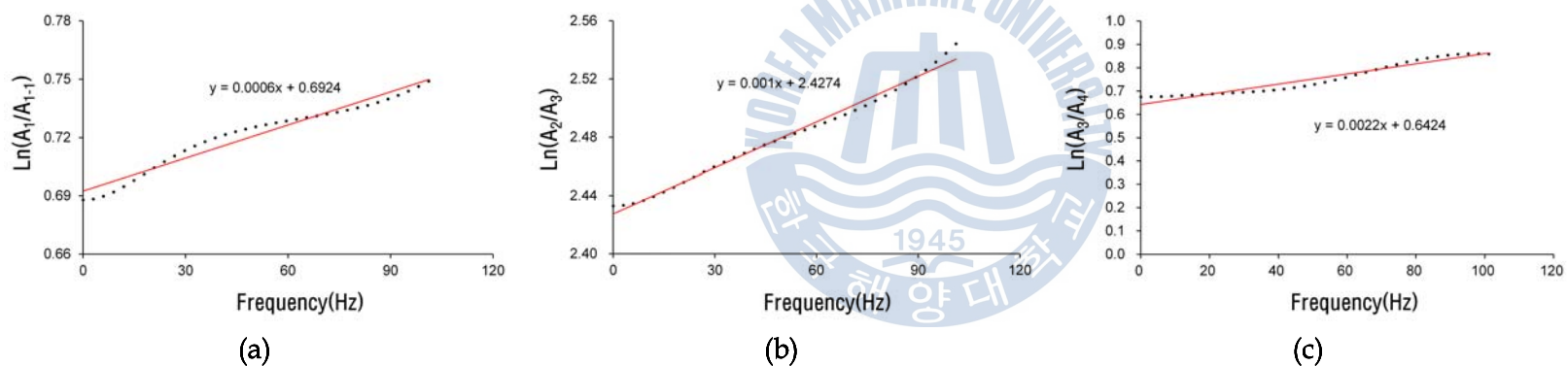


Fig. 23 The spectral ratios between layers and the line of best fit for shot-receiver interval 100m

모델의 이론값과의 오차율은 12.6%, 100m 일 때의 오차율은 6.8%로 확인되었다. 음원-수진기 간의 간격이 10m 일 때는 음원과 수진기의 간격이 너무 가까이 위치하여 직접파의 진폭이 매우 크게 나타나게 되어 감쇠효과의 영향을 적게 받아 위와 같은 결과가 나타나지만, 음원-수진기 간의 간격이 100m 일 때는 반대로 그 거리가 너무 멀리 떨어져 있기 때문에 반사파에 비하여 지층 경계에서 일어나는 여러 가지 감쇠효과의 영향과 기하학적 확산 손실의 영향을 받는 것으로 사료된다.

1층의 Q 를 제외하면 전체적으로 반사법 탐사에 비해 수직입사 탐사법이 계산값과 모델의 이론값에서 보다 유사하게 일치하는 경향을 보인다. 이는 수직입사 탐사법의 경우, 탄성과 신호가 평면파라는 가정하에 음원으로부터 반사면까지 수직으로 지층을 전파하므로 감쇠효과 중 굴절에 의한 영향이 제외된다. 따라서 탄성과 신호의 감쇠효과 중 반사, 투과 등의 고유감쇠와 기하학적 확산 손실에 의한 영향이 우세하다고 판단된다.

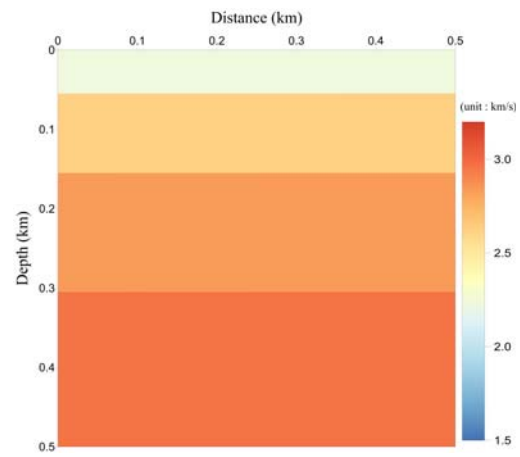
3.2.3.2 2번 모델

Table 5 Experimental result of attenuation coefficient and Q values in case of normal incidence survey model No. 2

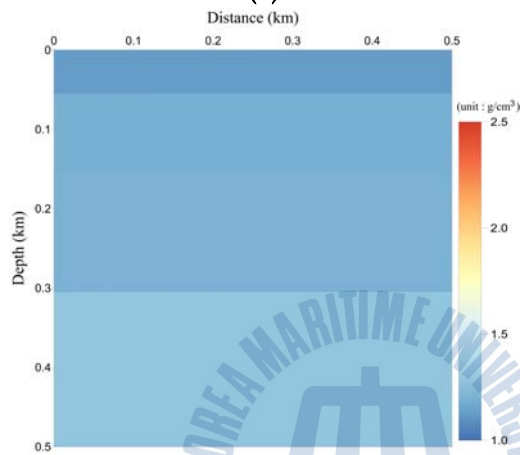
	γ	theoretical Q	calculated Q
2층	0.0024	100	101.9923
3층	0.0022	150	151.1906

2번 모델은 1번 모델과 반대로 지층 모델의 심도에 깊어짐에 따라 Q 가 증가하는 모델로써, 지층의 물성은 Fig 24에 나타내었다. 1번 모델과 동일하게 중심 주파수 50Hz인 음원을 사용하였으며, 수직입사 탐사법의 결과는 Table 5에서, 반사법 탐사의 결과는 Table 6에서 나타내었다.

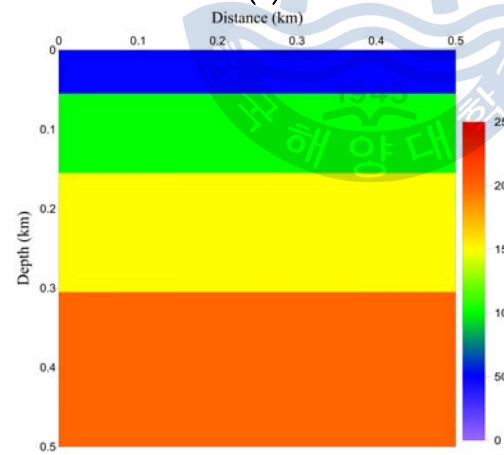
수직입사 탐사의 경우, 2층은 약 2%, 3층은 약 8% 정도의 오차율을 보이며 수치 모델의 이론값과 계산값이 거의 유사함을 알 수 있다. 또한 반사법 탐사의 경우도 각각 1층에서 약 11.3%, 2층에서 약 3.7%, 3층에서 0.9%의 오차율을



(a)



(b)



(c)

Fig. 24 A schematic of layered model No.2 with physical properties, (a)velocity, (b)density and (c) Q value

Table 6 Experimental result of attenuation coefficient and Q values for reflection survey model No. 2 in case of shot-receiver interval 10m

	10m		
	γ	theoretical Q	calculated Q
1층	0.0003	50	44.3534
2층	0.0023	100	103.7243
3층	0.0022	150	151.3591

보였다.

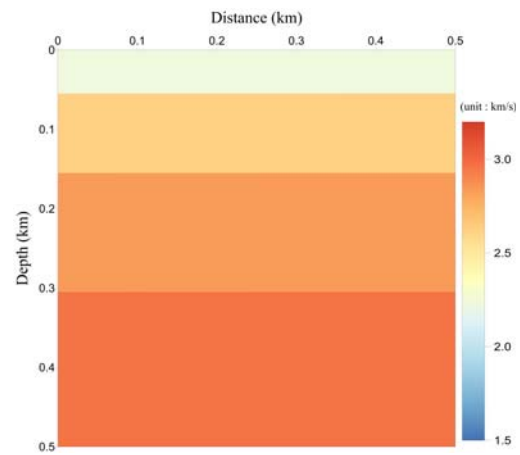
이는 1번 모델과 다르게 지층 모델의 심도가 깊어질수록 Q 가 증가하는 형태로써, 1층의 경우는 Q 가 모델의 이론값과 유사한 경향을 보이지만, 얇은 심도에서부터 많은 감쇠가 일어나며 탄성파가 전파하는 형태의 모델이기 때문에 2층과 3층의 Q 는 천부층에서 보다 많은 감쇠로 인해 영향을 받은 것으로 사료된다.

3.2.3.3 3번 모델

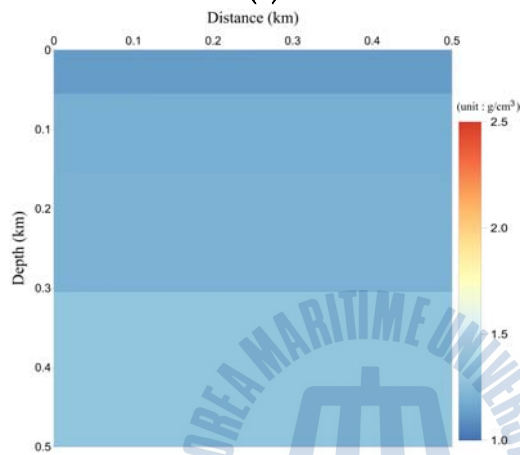
3번 모델은 음원 주파수를 50Hz와 100Hz하였을 때와 음원과 수신기 간격을 달리했을 때의 조건에 따라 주파수의 변화와 기하학적 확산손실에 따른 감쇠효과를 확인하였고, 지층의 물성은 Fig 25에 나타내었다. Table 7은 중심 주파수 50Hz인 음원을 사용하였을 때, 수직입사 탐사법을 적용한 결과이다.

Table 7 Experimental result of Frequency dependent gradient and Q values in case of normal incidence survey model No. 3 in case of source frequency 50Hz and 100Hz

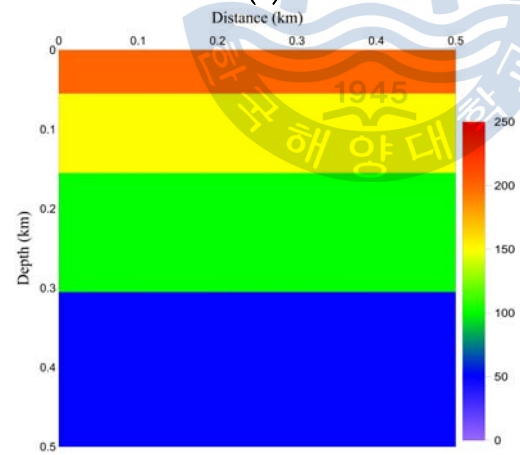
	50Hz			100Hz		
	γ	theoretical Q	calculated Q	γ	theoretical Q	calculated Q
2층	0.0016	150	152.4974	0.0018	150	133.4664
3층	0.0034	100	98.9722	0.0031	100	108.6525



(a)



(b)



(c)

Fig. 25 A schematic of layered model No.3 with physical properties, (a)velocity, (b)density and (c) Q value

1층에서 약 1.6%, 2층에서 약 1.0%의 오차율을 보이지만, 100Hz의 음원을 사용하였을 때는 1층에서 약 11.0%, 2층에서 약 8.6%의 오차율을 보인다. 일반적으로 지표탄성과 탐사의 경우, 고주파수 성분의 음원을 사용하였을 때, 보다 더 높은 해상도의 지하구조 영상과 물성정보를 얻을 수 있다. 그러나 탄성과 진폭 감쇠의 측면에서는 제 2장에서 설명한 바와 같이 저주파수 성분의 음원보다 고주파수 성분의 음원이 지하 매질을 통과할 때, 보다 감쇠가 빠르게 일어나는 현상과 일치한다.

Table 8 Experimental result of attenuation coefficient gradient and Q values for reflection survey model No. 3 in case of shot-receiver interval 10m and 100m with source frequency 50Hz

	10m			100m		
	γ	theoretical Q	calculated Q	γ	theoretical Q	calculated Q
1층	0.00006	200	218.0883	0.0007	200	201.2419
2층	0.0016	150	150.1779	0.0015	150	134.2801
3층	0.0033	100	101.3411	0.0033	100	98.2433

Table 8은 음원의 중심주파수가 50Hz 일 때, 음원과 수신기의 거리에 따른 감쇠영향에 대한 결과이다. 1번 모델과 마찬가지로 대체로 음원-수진기의 거리가 멀어짐에 따라 오차율이 커지는 것을 확인 할 수 있다. 음원과 수신기의 거리가 10m 일 때, 1층의 오차율은 9.0%, 2층은 0.1%, 3층은 1.3%이고, 음원과 수신기의 거리가 100m 일 때는 1층의 오차율은 0.6%, 2층은 10.5%, 3층은 1.8%로 2층을 제외한 나머지 지층모델에서는 대체로 모델의 이론값과 유사한 경향을 보인다.

Table 9는 음원의 중심주파수가 100Hz 일 때, 음원과 수신기의 거리에 따른 감쇠영향에 대한 결과이다. 음원과 수진의 거리가 10m 일 때는 2층을 제외한 층에서 이론값과 거의 유사한 값을 가지고 있지만, 음원과 수진의 거리가 100m 일 때는 전체적으로 모델의 이론값과 상이함을 확인 할 수 있다. 이는 탄성파가 지층을 전파하는 동안 진폭에 영향을 크게 주는 주행거리와 음원의

성분이 고주파수 일 때 보다 저주파수 일 때 빠르게 감쇠되는 것으로 사료된다. 즉 음원의 중심 주파수가 고주파수 일수록 더 많은 진동이 발생하므로 지층을 구성하는 매질의 입자 또한 저주파수 일 때 보다 진동으로 인한 더 많은 마찰열이 발생하게 되므로 고유감쇠로 인해 영향이 우세하다고 판단된다.

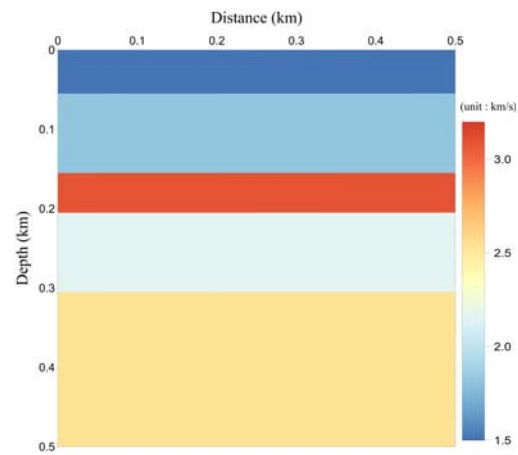
Table 9 Experimental result of attenuation coefficient and Q values for reflection survey model No. 3 in case of shot-receiver interval 10m and 100m with source frequency 100Hz

	10m			100m		
	γ	theoretical Q	calculated Q	γ	theoretical Q	calculated Q
1층	0.00006	200	198.5649	0.0008	200	170.9462
2층	0.002	150	132.0673	0.0015	150	133.9154
3층	0.0033	100	100.9061	0.0032	100	99.1644

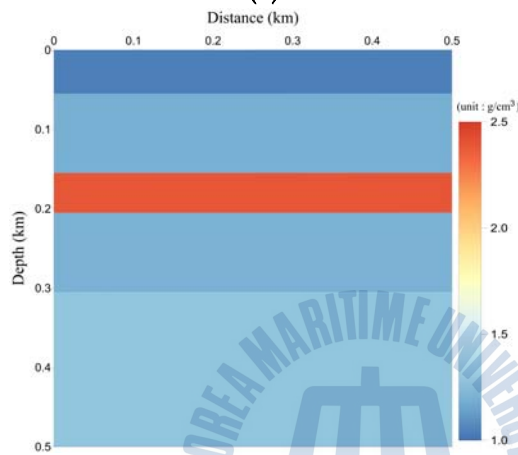
3.2.3.4 4번 모델

4번 모델은 앞에서 수행한 수치모형실험들을 특성을 반영하여, 지층 중간에 상·하부층이 반복되고 탄성과 속도 및 밀도 차이에 의해 큰 음향 임피던스 차이를 가지고 있는 급격한 물성 변화를 포함한 지층을 삽입하여 실제 지질구조에 가까운 모델로 구성하였다. 특히 진폭의 역전현상과 진폭변화를 통해 탄성파가 해당 지층 하부층을 전파할 때의 탄성과 자료에 대한 영향을 확인하였다. 지층의 물성은 Fig 26에 나타내었다. Table 10은 수직 입사 탐사의 결과를, Table 11은 반사법 탐사 결과를 나타내었다. 두 자료 모두 공통적으로 급격한 물성 변화를 가지는 지층인 3층과 그 하부 지층인 4층의 Q는 이론값과 거의 유사한 경향을 보이지만 그 상부 지층인 2층의 경우, 수직 입사 탐사의 경우 11.6%, 반사법 탐사의 경우 11.4%로 이론값과의 오차율이 큰 것을 확인할 수 있다.

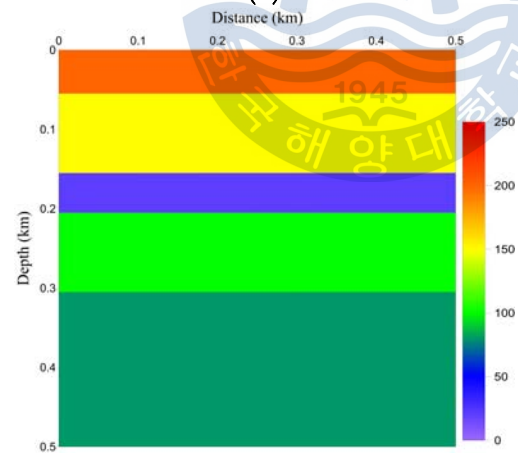
Spectral ratio method의 경우, 층간 반사면에서 발생하는 진폭 변화 비율을 이용하여 감쇠정도를 분석하는 방법이기 때문에 2층과 3층의 경계면에서 발생



(a)



(b)



(c)

Fig. 26 A schematic of layered model No.4 with physical properties, (a)velocity, (b)density and (c) Q value

Table 10 Experimental result of attenuation coefficient gradient and Q values in case of normal incidence survey model No. 4

	γ	Q
2층	0.0025	137.5824
3층	0.0051	20.7690
4층	0.003	100.0869

한 급격한 물성 및 속도 변화로 인한 결과로 인해 2층의 계산값이 이론값과 차이가 발생한 것으로 추정된다. 이는 급격한 물성 변화를 가지는 지층과 그 하위의 지층의 경계면에서 탄성과 속도 및 밀도 차이로 인하여 극성이 역전되어 나타나는 현상(Shibley et al., 1979)과 유사하며, Fig 27에 나타낸 것과 같이 2층과 3층의 경계에 대한 시간영역 주파수에서 주파수 역전현상을 확인 할 수 있다.

Table 11 Experimental result of attenuation coefficient and Q values for reflection survey model No. 4 in case of shot-receiver interval 10m

	γ	theoretical Q	calculated Q
1층	0.0001	200	208.3705
2층	0.0026	150	132.8797
3층	0.0050	20	20.3016
4층	0.0029	100	100.106

또한 급격한 물성 변화를 가지는 지층과 그 하위의 지층을 통과한 반사파는 고주파수 성분이 감쇠되어 저주파수 성분이 우세해지고(Hyndman et al., 1992), 이는 2층을 통과한 반사파 중심주파수를 나타낸 Fig 27과 급격한 물성 변화를 가지는 지층을 통과한 이후 5층의 반사파 중심주파수 성분을 나타낸 Fig 28에서 중심 주파수가 변한 것을 통해 확인 할 수 있다.

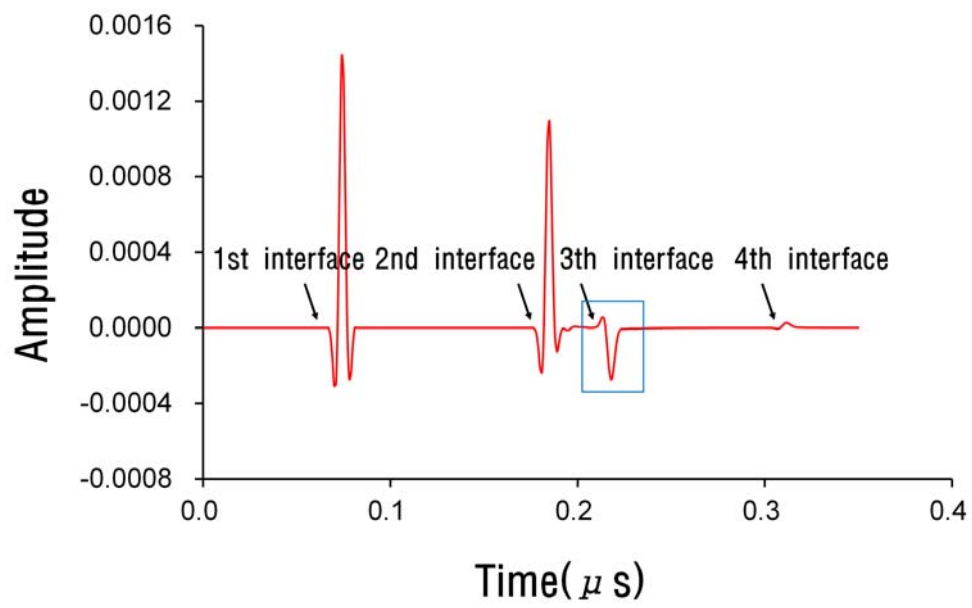
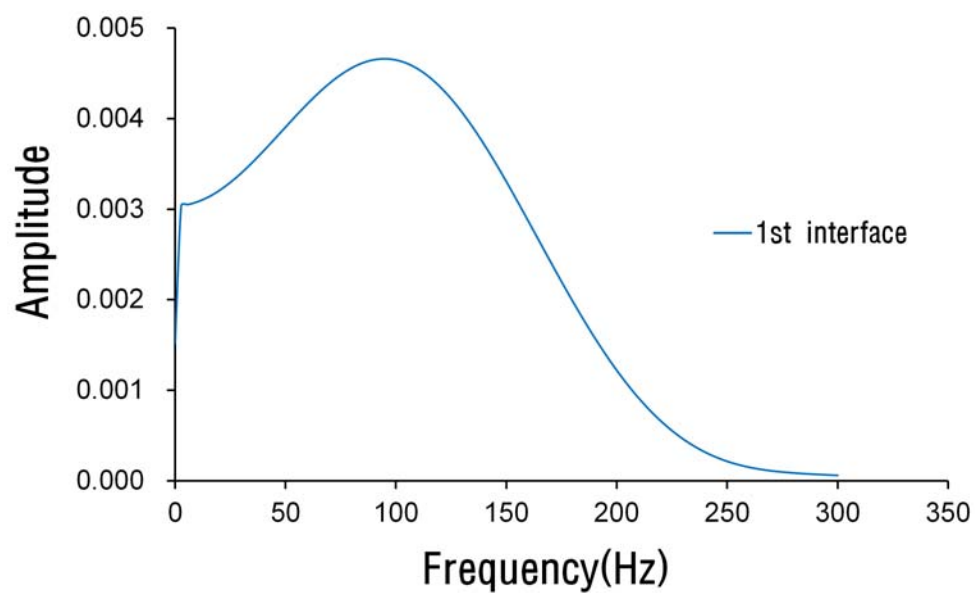
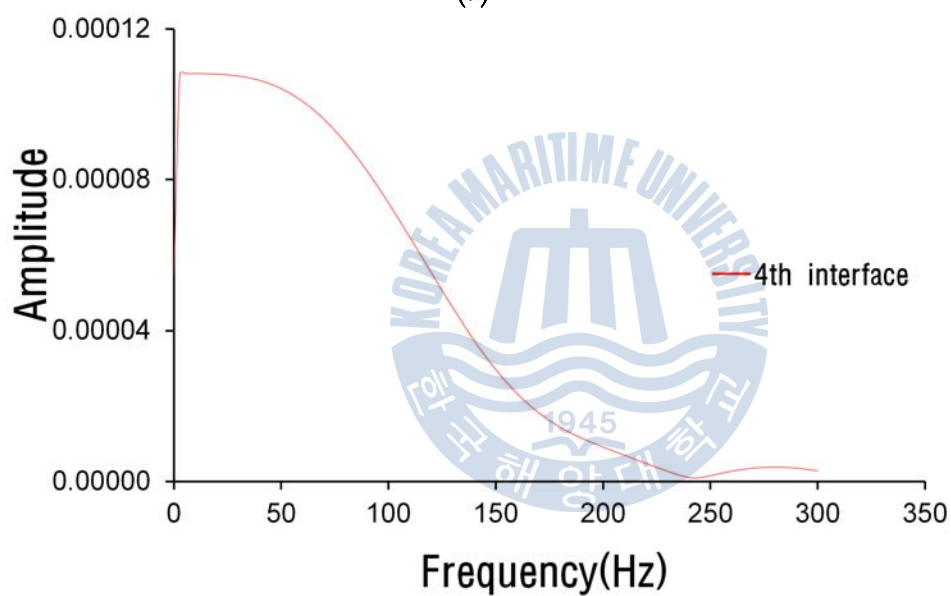


Fig. 27 Time domain waveform for model No. 4





(a)



(b)

Fig. 28 The spectral amplitude of central frequency shift for model No. 4

3.3. 현장 자료적용

3.3.1 현장 자료 취득 및 처리

본 연구에서는 실내시험방법인 **Spectral ratio method**를 현장 자료와 유사한 수치모형실험에서 적용 가능한지 확인 후 실제 현장 자료에 적용하여 Q 를 산출하였다. 탐사구역은 경상남도 거제시 다포리에서 남동쪽으로 7km 떨어진 해상에서 고해상 탄성과 탐사를 수행하였고, Fig. 29와 같이 고휘경(2013)이 수직적 해상도를 높이기 위해 너울 필터(swell filter), 디지털 필터링(digital filtering), 디콘볼루션(deconvolution) 등의 자료처리 기법을 이용하여 수행한 선행 연구 결과인 탄성과 자료에 대하여 탄성과 감쇠 효과를 분석하였다.

해양 탄성과 반사법 탐사 기록상에는 지하의 각 경계면에서 반사되어 돌아온 단순 반사파(simple reflection)외에도 여러 가지 다른 종류의 파들이 함께 나타난다. 이들 중 우리가 원하는 정보를 포함하고 있는 탄성과 에너지를 신호(signal)라고 하며, 이 외의 모든 에너지를 잡음(noise)이라 한다. 반사파 기록에서는 물론 단순반사파(또는 이차반사파, primary reflection)가 신호이지만, 단층 지역에서 나타나는 회절파와 같이 지질구조에 대한 특정한 정보를 제공하여 주는 경우에는 이것도 해석자에 따라 신호로 취급될 수 있다(김찬수, 2007).

싱글채널 탄성과 탐사 자료 처리는 멀티채널 탄성과 탐사 자료 처리에 비해 과정이 간편하고 정형적인 자료 처리 순서나 방법이 존재 하지 않기 때문에 순서와 방법은 기존의 연구 내용(김원식 등, 2009) 및 사용자가 최적의 변수를 확인하며 각각의 단계를 수행하고자 하였다.

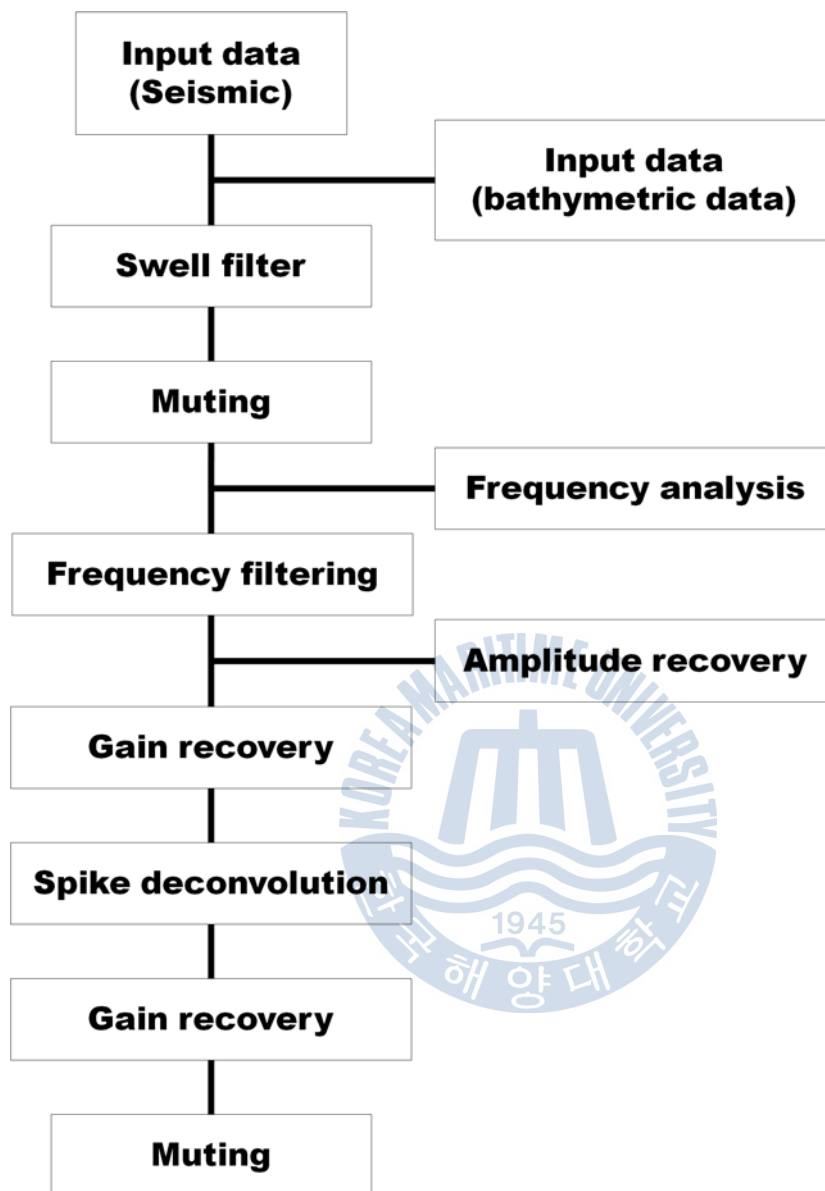


Fig. 29 Flow chart for single channel seismic data processing

3.3.2 현장 자료 적용 및 분석

Fig 30은 현장에서 취득한 자료를 처리한 지층의 단면이다. 일반적으로 결정질 암석의 경우 Q 가 500~1000 정도로 감쇠 정도가 적고, 균열이 있거나 다공질 암석의 경우 Q 가 10~100 정도로 감쇠 정도가 높다. (Toksöz et al., 1979). 또한 지표나 해저면 부근 미고결 퇴적층 혹은 동토층의 경우 Q 는 5~20 정도로 감쇠 정도가 매우 높다(Gusmeroli et al., 2010). 이는 탄성과 감쇠는 지층을 구성하는 암석의 공극이나 구성 입자의 크기에 영향을 받아 감쇠 정도가 변화하고, 특히 표층의 경우, 지층 하부로 내려 갈수록 점토의 감소, 실트와 모래가 증가와 함께 감쇠계수가 낮아진다(김성렬 등, 1991).

앞서 Table 1에서 나타난 것과 같이 해수의 Q 는 63,000정도로 매우 높음을 알 수 있다. 따라서 해상 탄성과 탐사에서 해수층을 통과하는 탄성과의 감쇠 효과는 매우 적으므로 해상 탄성과 탐사 시, 탄성과 음원으로부터 전달된 탄성과 에너지는 적은 감쇠로 해수면 하부의 지층에 도달한다.

Table 12 Result of attenuation coefficient and Q values for field data

	γ	Q
1층	0.003	7.3745
2층	0.0044	9.2194
3층	0.0005	36.8836
4층	0.0003	104.5731
5층	0.0009	105.3969

Table 12는 현장 자료로부터 산출한 지층의 Q 로, 탐사 대상 구역 지층은 총 6개의 층으로 구성되어 있다. 1층은 비교적 균질한 물질인 머드 및 실트로 구성된 세립질 퇴적층 일 것으로 판단되며, 2층의 경우, 과거 침식 혹은 퇴적환경에서 구성된 조립질 모래층을 것으로 사료된다. 3층은 머드와 실트로 구성된 층으로 구성되어 있고, 상부 퇴적층의 하중에 의한 영향으로 함수율이 낮아졌을 것으로 추정된다. 4층은 모래, 자갈질의 육상기원의 비교적 조립질 퇴적물이

우세하게 퇴적되어 있을 것으로 사료된다(고휘경, 2013).

탄성파를 전달하는 매질로써 작용하는 퇴적물은 입자 및 공극 공간에 충전된 해수로 구성되며, 이에 대한 전파 속도는 퇴적물의 탄성특성에 의해 결정된다. 이를 미루어 1층과 2층의 경우 미고결 퇴적층으로 사료되며, Q 가 약 7과 9정도로 탄성파가 통과할 때, 머드나 실트질로 구성된 퇴적층 내 입자간의 마찰에 의해 열로 전환되어 에너지가 매질에 흡수되는 고유감쇠와 지층 구성 입자의 공극에 따른 흡수손실 및 해수와 퇴적층의 경계면에서 발생하는 음향손실의 영향이 매우 클 것으로 추정된다. 3층 및 그 하부층의 경우 1층과 2층의 경우와 유사하나, 공극 내 충전된 해수의 함수율이 적고, 입자간의 압축률 상승에 따른 매질의 밀도가 향상되어 보다 높은 Q 를 가지는 것으로 보인다. 따라서 3층은 미고결 퇴적층에서 다공질 암석층으로 변해가는 중간 형태를 가지는 것으로 사료되고 4층과 5층은 다공질 암석층으로 추정된다.



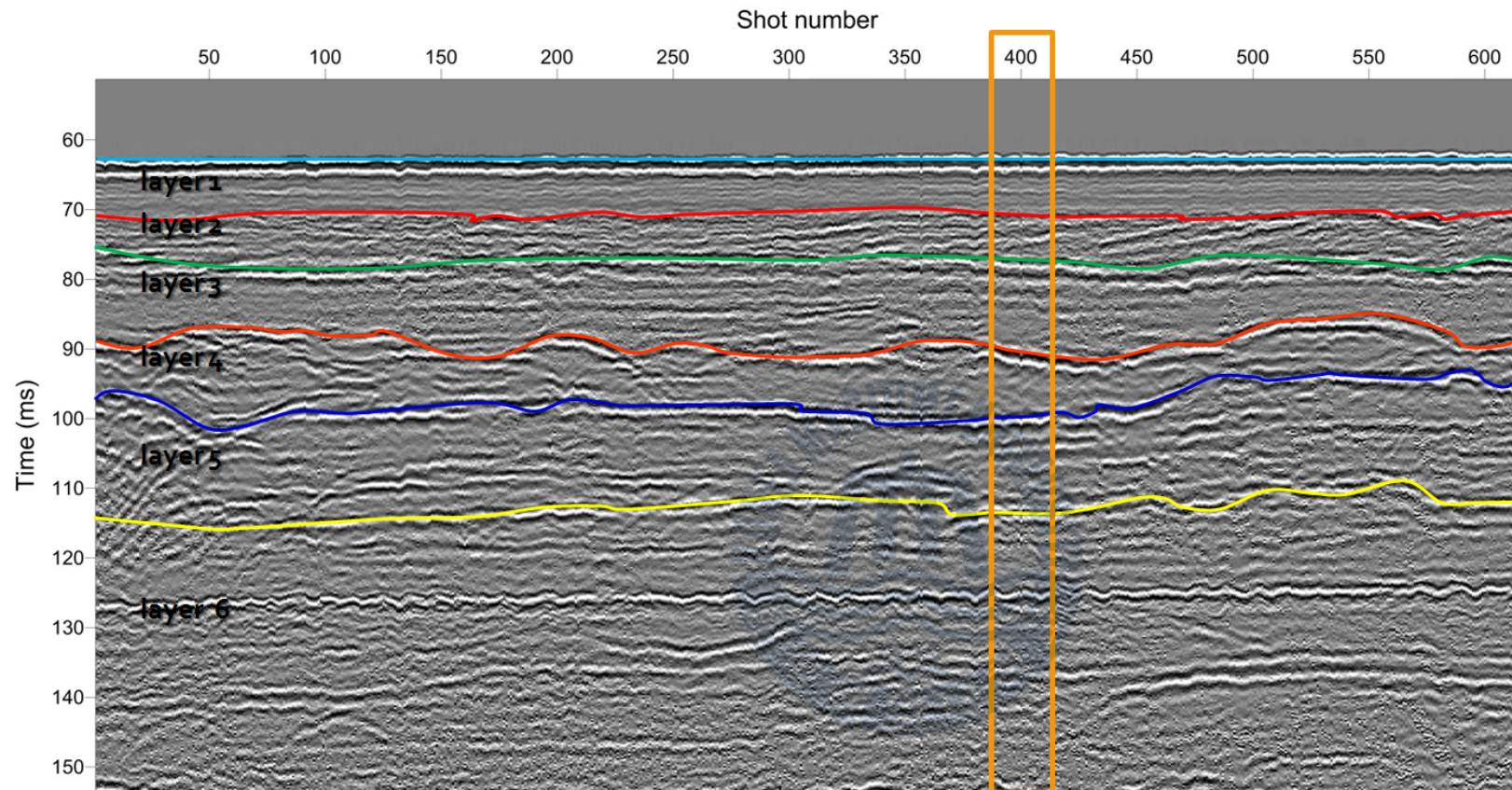


Fig. 30 A result of processed seismic section

제 4 장 결 론

본 논문은 축소 및 수치모형실험과 거제도 해역에서 취득한 탄성과 탐사 자료에서 대해 **Spectral ratio method**를 적용하여 탄성과 에너지가 매질을 통과하며 발생하는 감쇠와 그에 대해 영향을 미치는 요인을 분석 및 확인 하였다. 이를 통해 탄성과 감쇠 특성에 대하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1. 축소모형실험을 통해 실내분석방법으로 아크릴의 Q 를 산출하였다. 기준 시료인 알루미늄과 비교 시료인 아크릴의 모양과 크기를 동일하게 만들어 시료의 각 축에 대하여 기하학적 확산손실의 영향을 제거하고, 파가 시료를 전파하는 동안 고유감쇠로 인해 매질 내부에서 발생한 탄성과 감쇠 양상을 확인한 결과 시료의 축에 관계없이 20~21로 거의 유사한 Q 를 가짐을 확인 할 수 있었다. 또한 선행연구의 결과와 일치함을 확인하였다.

2. 수치모형실험의 결과, 반사법 탐사 보다 수직 입사 탐사에서 보다 정확한 지층의 Q 를 확인 할 수 있었다. 이는 기하학적 확산손실이나 고유감쇠에 의한 영향은 두 탐사법 모두 동일하게 적용되지만 수직 입사 탐사에서는 탄성과의 굴절이나 회절에 의해 발생하는 산란의 효과가 거의 발생하지 않는 것이 원인으로 사료된다. 따라서 VSP 탐사 등과 같이 탄성파가 음원에서 수진기로 한번에 전달되는 탐사법을 사용한다면, 감쇠가 많이 발생하는 풍화층 또는 미고결층을 두 번 통과하게 되는 반사법 탐사나 수직 입사 탐사에 비해 동일한 음원을 사용할 경우에도 기하학적 확산손실이나 고유감쇠로 인한 탄성과 에너지의 손실을 줄여 보다 더 정확한 지층의 Q 를 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

3. 상·하부층이 반복되고 탄성과 속도 및 밀도 차이에 의해 큰 음향 임피던스 차이를 가지는 층에 대한 탄성과 감쇠 수치모형실험의 결과, 해당 층과 그 하부층을 통과한 반사파는 고주파수 성분이 감쇠되어 저주파수 성분이 우세해짐을 확인 할 수 있었다. 반사법 탐사와 수직 입사 탐사 방법 모두 급격한 물성 변화를 가지는 직상부층에서의 Q 가 이론값과 계산값에서 오차가 발생함을 확인하였다. 이는 물성 변화를 가지는 층과 그 하부층의 경계면에서 지층의 급격한 물성 변화에 기인한 탄성과 속도 및 밀도의 차이에 의한 것으로 탄성과 에너지의 급격한 감쇠와 반사파의 위상역전 현상을 관찰할 수 있었다. 이를 통해 현장 탐사 자료에 대하여 시추나 VSP 탐사와 같은 정밀탐사가 수반되지 않는다면 지층의 감쇠 특성에 대한 잘못된 정보를 제시할 가능성이 있음을 확인 할 수 있었다.

4. 탄성과 반사법을 통해 취득한 현장 자료에 대하여 지층의 구성 입자의 크기에 따른 탄성과 감쇠효과를 분석하였다. 미고결 퇴적층인 상부층에서 하부층으로 내려 갈수록 입자간의 압축률과 지층을 구성하는 공극의 크기가 상승하고, 공극 내 충전 된 해수의 함수율이 감소하므로 전파거리에 따른 기하학적 확산손실보다는 매질의 상태나 지층의 경계조건에 따라 좌우되는 고유감쇠에 의한 영향이 큰 것으로 사료된다. 또한 4층 이하의 지층은 100정도의 Q 를 가짐으로 지층의 구성 입자가 큰 다공질 암석으로 추정된다.

5. 본 연구를 통하여 탄성과 감쇠계수를 측정할 수 있는 측정 시스템을 개발하였다. 측정 시스템의 개선에 대한 여지는 남기고 있지만, 기초적인 기반은 갖춘 상태이므로 앞으로 지속적인 연구 결과의 축적을 통해 개선책이 마련될 것으로 사료된다.

본 연구에서 분석한 탄성과 감쇠 특성에 대한 축소모형실험 및 수치모형실험의 자료는 보다 다양한 현장 자료에 대한 적용을 통해 향후 석유, 가스 혹은 가스 하이드레이트 등 지하자원탐사를 위하여 다양하고 심도 깊은 연구를 위한 기초자료로 활용 될 수 있을 것이라 사료된다.

감사의 글

힘들고 어려웠지만 하나하나 알아가는 즐거움과 많은 것을 배우고 또 스스로 많이 모자라다는 것을 느끼게 해준 2년간의 석사과정이었습니다. 여러분들의 도움으로 이 자리에 서게 되어 마땅히 찾아뵙고 인사드려야겠지만 그렇게 하지 못하는 점 너그러운 마음으로 이해해주시길 바라며 이 글로써 감사의 인사를 대신할까합니다.

먼저, 부족한 저에게 공부할 수 있도록 기회를 주시고, 연구를 하는데 있어서 큰 틀을 보는 안목과 나아갈 방향을 제시해주셔서 어떤 상황에서도 대처할 수 있는 능력을 길러주신 신성렬 교수님의 하해와 같은 은혜에 깊은 감사를 드립니다. 그리고 항상 아버지와 같은 자상함으로 격려해주시고 보살펴주신 장원일 교수님, 바쁘신 와중에도 논문을 검토해주시고 많은 조언을 해주신 정우근 교수님, 주옥같은 강의와 연구 뿐 만 아니라 후학들에게 귀감이 되는 연구자이신 박근필 교수님, 열정 가득한 모습으로 학생들을 지도하시는 임종세 교수님, 항상 밝은 미소를 지으시며 대해주신 유경근 교수님 그리고 많은 가르침을 주신 윤지호 교수님께 감사드립니다. 교수님들의 걱정 어린 조언과 격려의 말씀 항상 가슴 깊이 새겨 훌륭한 사회인이 되도록 노력하겠습니다.

석사과정 중 흔들리고 의지가 꺾일 때마다 저에게 힘이 되어주고 연구자로서 모범이 되는 모습을 보여준 선배이자 사랑하는 형인 지호형과 항상 ‘오빠는 잘 할 수 있어요’ 라고 응원하고 제게 의지가 되어 준 먼 이국땅에서 고생하고 있는 동생인 송이, 선배랍시고 아무것도 해준 것 없이 짜증만 냈는데도 녀석잘하게 받아주던 영목이 그리고 힘이 들 때마다 어떻게 알았는지 전화해서 격려해주던 영훈이와 재영이에게 감사의 말을 전합니다.

아무것도 모르고 시작한 석사과정 동안 많은 대화를 하며 서로에게 의지해 이겨낼 수 있게 해주었던 휘경이, 까불까불 거려도 생각 깊은 병수, 항상 말없이 부족한 형들을 잘 따라 주었던 민영이, 어떤 일이든 척척 해내는 믿음직한 연

진이, 형인지 동생인지 아직도 잘 모르겠는 승재, 연구실의 홍일점 보람이에게 모자란 선배이자 친구가 그동안 잘 도와주어 고개 숙여 인사드립니다. 그리고 이것저것 부탁만 해서 미안한 홍기, 바쁜 행정 업무 가운데서도 많은 것을 챙겨준 숙현이, 피곤에 찌들 때 같이 커피 마셔주던 병수, 항상 보고 배울게 많았던 선배이자 친구인 동건이, 늘 반갑게 맞아주며 많은 조언해주시던 판상이형에게 고마움을 전합니다.

마지막으로 제가 이 자리에서 공부할 수 있게 힘이 되어주신 부모님과 제 인생에 멘토이자 다시 학교로 돌아와 공부할 수 있게 격려해주시고 항상 사랑을 베풀어 주신 하늘에 계신 작은 아버지께 감사의 인사를 전하며, 지금까지 부족하지만 여러 가지로 보살펴주신 모든 분들께 이 논문을 바칩니다.



References

- 고휘경, 2013. *싱글채널 해양 탄성파 탐사자료의 속성분석 및 정밀해석*. 석사학위논문. 부산 : 한국해양대학교.
- 구남형, 남명진, 민동주, 박근필, 변중무, 신성렬, 신창수, 오석훈, 이호영, 편석준, 2011. *석유탐사공학 교재개발*. 한국지구시스템공학회.
- 김성렬, 이용국, 석봉출, 신동혁, 1991. 동해 심해분지 시추퇴적물의 음속과 감쇠계수. *한국해양학회지*, Vol. 26. pp.59-66.
- 김원식, 박근필, 정순홍, 박의섭, 2009. 대천-원산도해역 단일채널 탄성파자료 정밀처리 및 기반암 분포분석. *2009 Korea-Japan joint symposium on rock engineering*.
- 김찬수, 2007. *탄성파 반사법 및 굴절법을 이용한 천해저 지반조사에 대한 연구*. 석사학위논문. 부산 : 한국해양대학교.
- 서만철, 손호웅, 1996. 탄성파탐사에 의한 토양층 지반진동의 감쇠연구. *대한지질공학회*, Vol. 6. pp.95-102.
- 신성렬, 신창수, 장원일, 임종세, 2001. 3차원 탄성파 탐사 모형실험장치 개발. *한국자원공학회지*, Vol. 37. pp.424-431.
- 신성렬, 여은민, 김찬수, 박근필, 이호영, 김영준, 2006. 3차원 탄성파 탐사 축소 모형실험을 이용한 가스 하이드레이트의 지구물리학적 특성연구. *한국지구시*

스텝공학회, Vol. 4. pp.181-193.

이광호, Matsushima, J., 2009. 메탄하이드레이트 부존층에서의 지진파 감쇠치 산출. 한국지구물리·물리탐사학회 학술대회, 전북대학교, 2009년 12월 21-22일. pp.28-33.

하영수, 신성렬, 2011. 축소모형 실험을 이용한 횡적등방성 매질에서의 탄성파 이방성 특성. 한국지구시스템공학회, Vol. 48. pp.115-126.

한국해양연구소, 1991. 한반도 주변해역 해저퇴적물의 음향학적 특성연구(III). 안산 : 한국해양연구소.

Alessio, G., Roger A. C., Tavi, M., Adam, D. B., Bernd, K., Brain, B., 2010, *Instrument and methods seismic wave attenuation in the uppermost glacier ice of Storglaciären*. Journal of Glaciology, Vol. 56. pp.249-256.

Aki, K., Richards, P. G., 2009. *Quantitative seismology*. 2nd ed., University Science Books : San Francisco.

Dasgupta, R. & Clark, R. A., 1998. *Estimation of Q from surface seismic reflection data*. Geophysics, Vol. 63. pp.2120-2128.

Galdwin, M. T., F. D. Stacey, 1974. *Anelastic degradation of acoustic pulses in rocks*. Physics of the Earth and Planetary Interiors, Vol. 28, pp.17-22.

Gusmeroli A., Clark R. A., Murray T., Booth A. D., Kulesa B., Barrett BE., 2010. *Seismic wave attenuation in the uppermost glacier ice of Storglaciären*, Journal of Glaciology, Vol. 56. pp.249-256.

Hyndman ,R. D. Spencer, G. D., 1992. *A seismic study of methane hydrate marine bottom simulating reflectors*. Journal of Geophysics, Vol. 97. pp.6683-6698.

John M. R., 1997. *An introduction to applied and environment geophysics*. John Wiley & Sons Ltd. : west sussex

Kinsler, L. E., A. R. Frey, A. B. Coppens & J. V. Sanders, 2000. *Fundamentals of Acoustics* 4th ed., John wiley & Sons.

Knopoff, L., 1964. Q. Rev. Geophysics., Vol. 2. pp.625-660

Kuster, G. T., & Toksöz, M. N., 1974. *Velocity and attenuation of seismic waves in two-phase media: Part II-Experimental results*. Geophysics, Vol. 39. pp.587-606

Matsushima, J., 2005. *Attenuation measurements from sonic waveform logs in methane hydrate-bearing sediments at the Nankai Trough exploratory well off Tokai, central Japan*. Geophysical Research Letters, Vol. 32. L03306.

Matsushima, J., 2006. *Seismic wave attenuation in methane hydrate-bearing sediments : VSP data from the Nankai Trough exploratory well off Tokai, central Japan*. Journal of Geophysical Research, Vol. 111. JB004031

Peselnick, L., Zietiz, I., 1959. *Internal friction of finegrained limestones at ultrasonic frequencies*. Geophysics, Vol. 62. pp.1163-1167.

Purnell, G. W., 1986. *Observations of wave velocity & attenuation in two-phase media*. Geophysics, Vol. 51. pp.2193-2199

Sears, F. M., Bonner, B. P., 1981. *Ultrasonic attenuation measurements by spectral ratios utilizing signal processing techniques*. IEEE Transact. Geosci., Remote Sensing, GE. pp.95-99.

Sheriff, R. E., Glendart, L. P., 1995. *Exploration Seismology*. 2nd ed., Cambridge University Press :New York.

Shipley, T. H., Houston, M. H., Buffler, R. T., Shaub, F. J., McMillen, K. J., Ladd, J. W. & Worzel, J. L., 1979. *Seismic reflection evidence for widespread occurrence of possible gas-hydrate horizons on continental slopes and rises*. American Association Petroleum Geologists Bulletin. Vol. 63. pp.2204-2213.

Tarif, P., & Bourbie, T., 1987. *Experimental comparison between spectral ratio and rise time techniques for the measurements of attenuation*. Geophysics, Vol. 41. pp.668-680

Toksöz, M. N., D. H. Johnston & A. Timur, 1979. *Attenuation of seismic waves in dry and saturated rocks: I. Laboratory measurements*. Geophysics, Vol. 44. pp.681-690

Toksöz, M. N., D. H. Johnston, 1981. *Seismic wave attenuation*. 2nd ed., Society of Exploration Geophysicists : Tulsa

Vogel, J. A., Stelwagen, U., & Breeuwer, R., 1985. *Seismic analysis of thin beds aided by 3D physical model experiments*. Pro. of the 14th international Symposium of Acoustical Imaging, Vol. 14. pp.53-67

Zamanek, J., Jr., & Rudnick, J., 1961. *Attenuation and dispersion of elastic waves in a cylinder bar*. J. Acoust. Soc. Am. pp.1283-1288.

Bibliography

현병구, 1995. *물리탐사용어사전*. 선일문화사.

Lee, H. B., Zhao, W. Z., Cao, H., Yao, F. C., Shao, L. Y., 2004. *Characteristics of seismic attenuation in gas reservoirs in the domain of wavelet scales*. Chinese Journal of Geophysics, Vol. 47. pp.1005-1013.

Paul, P., Stephen, B., Adam, D., 2005. Frequency dependent spectral ratio technique for Q estimate. *Proceedings of the 2nd International workshop on Rainbow in the Earth*, Berkeley, August 17-18, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2005.

Sarma, L. P., Ravikumar, N., 2000. *Q-factor by spectral ratio technique for strata evaluations*. Engineering Geology 57. pp.123-132.

